

SÉRIE A, N° 1906

N° D'ORDRE :

2773

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

FRANTZ PERRIER

Assistant à la Faculté des Sciences de Montpellier.

1^{re} THÈSE. — IONISATION DE L'AIR PAR LES DIÉLECTRIQUES
ÉLECTRISÉS.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **Octobre 1939** devant la Commission d'examen.

MM. A. COTTON..... *Président.*

CABANNES..... } *Examineurs.*

F. CROZE..... }

Disp. Soutenance

I. M. 16 Sept. 1939

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1939

SÉRIE A, N° 1906

N° D'ORDRE :

2773

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

FRANTZ PERRIER

Assistant à la Faculté des Sciences de Montpellier.

1^{re} THÈSE. — IONISATION DE L'AIR PAR LES DIÉLECTRIQUES
ÉLECTRISÉS.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **Octobre 1939** devant la Commission d'examen.

MM. A. COTTON.....	<i>Président.</i>
CABANNES.....	} <i>Examineurs.</i>
F. CROZE.....	

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—
1939

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire..... M. MOLLIARD.

Doyen..... C. MAURAIN, Professeur, Physique du Globe.

Professeurs honoraire.	H. LEBESGUE.	LESPIEAU.	ABRAHAM.
	Émile PICARD.	MARCHIS.	Ch. FABRY.
	Léon BRILLOUIN.	VESSIOT.	Léon BERTRAND
	GUILLET.	PORTIER.	WINTREBERT.
	PÉCHARD.	MOLLIARD.	DUBOSQ.
	FREUNDLER.	LAPICQUE.	BOHN.
	AUGER.	G. BERTRAND.	RABAUD.
	DANGEARD.		

PROFESSEURS

M. CAULLERY.....	T Zoologie (Évolution des êtres organisés).	FOCH.....	Mécanique expérimentale des fluides.
Émile BOREL.....	T Calcul des probabilités et Physique mathématique.	PAUTHENIER.....	Physique (P. C. B.).
Jean PERRIN.....	T Chimie physique.	De BROGLIE.....	T Théories physiques.
E. CARTAN.....	T Géométrie supérieure.	CHRÉTIEN.....	Optique appliquée.
A. COTTON.....	T Recherches physiques.	P. JOB.....	Chimie générale.
J. DRACH.....	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	LABROUSTE.....	Physique du Globe.
Charles PÉREZ.....	T Zoologie.	PRENANT.....	T Anatomie et Histologie comparées.
M. GUICHARD.....	T Analyse et mesures chimiques.	VILLEY.....	Mécanique physique et expérimentale.
Paul MONTEL.....	T Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	COMBES.....	T Physiologie végétale.
L. BLARINGHEM..	T Botanique.	GARNIER.....	T Mathématiques générales.
G. JULIA.....	T Mécanique analytique et Mécanique céleste.	PÈRES.....	Mécan. théor. des fluides.
C. MAUGUIN.....	T Minéralogie.	HACKSPILL.....	T Chimie minérale.
A. MICHEL-LÉVY..	T Pétrographie.	LAUGIER.....	T Physiologie générale.
A. DENJOY.....	T Application de l'analyse à la Géométrie.	TOUSSAINT.....	Technique Aéronautique.
L. LUTAUD.....	T Géographie physique et géologie dynamique.	M. CURIE.....	Physique (P. C. B.).
Eugène BLOCH....	T Physique.	G. RIBAUD.....	T Hautes températures.
G. BRUHAT.....	T Physique théorique et physique céleste.	CHAZY.....	T Mécanique rationnelle.
E. DARMOIS.....	T Enseignement de Physique.	GAULT.....	Chimie (P. C. B.).
A. DEBIERNE.....	T Physique Générale et Radioactivité.	CROZE.....	Recherches physiques.
A. DUFOUR.....	T Physique. (P. C. B.).	DUPONT.....	T Théories chimiques.
L. DUNOYER.....	Optique appliquée.	LANQUINE.....	T Géologie structurale et géologie appliquée.
A. GUILLIERMOND.	T Botanique.	VALIRON.....	Mathématiques générales.
M. JAVILLIER.....	T Chimie biologique.	BARRABÉ.....	Géologie structurale et géologie appliquée.
ROBERT-LÉVY....	T Physiologie comparée.	MILLOT.....	Biologie animale (P.C.B.)
F. PICARD.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés).	F. PERRIN.....	Théories physiques.
Henri VILLAT....	T Mécanique des fluides et applications.	VAVON.....	Chimie organique.
Ch. JACOB.....	T Géologie.	G. DARMOIS.....	Calcul des Probabilités et Physique-Mathématique
P. PASCAL.....	T Chimie générale.	CHATTON.....	T Biologie maritime.
M. FRÉCHET.....	T Calcul différentiel et Calcul intégral.	AUBEL.....	Chimie biologique.
E. ESCLANGON....	T Astronomie.	Jacques BOURCART.	Géographie physique et géologie dynamique.
M ^{me} RAMART-LUCAS	T Chimie organique.	M ^{me} JOLIOT-CURIE.	Physique générale et Radioactivité.
H. BEGHIN.....	T Mécanique physique et expérimentale.	PLANTEFOL.....	Biologie végétale (P.C.B.)
		CABANNES.....	Enseignement de Physique.
		GRASSÉ.....	Biologie animale (P. C. B.).
		PRÉVOST.....	Chimie (P. C. B.).
		BOULIGAND.....	Mathématiques.
		G. CHAUDRON....	Chimie (P. C. B.).

Secrétaire..... A. PACAUD.
Secrétaire honoraire..... D. TOMBECK.



A MONSIEUR G. REBOUL
Professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier

Hommage respectueux et reconnaissant

A MONSIEUR J. CABANNES

Membre correspondant de l'Institut
Professeur à la Sorbonne

Hommage respectueux



IONISATION DE L'AIR PAR LES DIÉLECTRIQUES ÉLECTRISÉS

Par F. PERRIER

INTRODUCTION

But de ce mémoire. Travaux antérieurs.

Plan suivi.

Le travail présenté ci-dessous est une contribution à l'étude de la décharge des diélectriques solides électrisés par frottement.

Deux expériences qualitatives, faciles à exécuter sans matériel spécial, montrent bien la complexité du problème.

1° On constate facilement que pour conserver le plus longtemps possible sa charge à un diélectrique, il convient de l'envelopper d'une feuille métallique.

2° Un isolant propre et sec conserve pendant plusieurs semaines une charge importante : il se décharge instantanément si on le place dans un récipient où l'on fait le vide.

Il faut conclure que l'air qui entoure un diélectrique joue un rôle primordial dans sa décharge. Il était légitime de chercher si à son tour le diélectrique n'agissait pas sur l'air pendant sa décharge. M. Reboul ⁽¹⁾ supposa que le diélectrique émettait un rayonnement ionisant.

(1) G. REBOUL. *Journal de Physique* [7], 5 (1934), 329.

C'est cette hypothèse que je me suis proposé de vérifier. D'après les premières mesures de M. Reboul le rayonnement se situerait dans le domaine intermédiaire. Comme ce rayonnement devait être peu intense, j'ai été contraint de l'étudier à la chambre d'ionisation associée à l'électromètre ;

J'ai d'abord justifié l'emploi de l'électromètre pour la mesure de courants très faibles et j'expose quelques résultats d'une étude systématique faite en vue d'obtenir le maximum de sensibilité tout en réduisant au minimum les diverses perturbations susceptibles de fausser les mesures.

J'ai fait ensuite l'étude expérimentale du phénomène : d'abord à l'aide du dispositif ayant servi à M. Reboul puis à l'aide d'un appareillage plus perfectionné que l'expérience m'a amené à mettre au point. Le rappel des résultats classiques concernant l'étude des diélectriques, indispensables pour comprendre la discussion des expériences a été fait dans cette partie.

Enfin j'ai donné une explication théorique du phénomène : cela m'a conduit à rechercher une corrélation entre la fréquence du rayonnement émis et la constante diélectrique du corps émetteur et m'a permis un essai d'explication quantique du rayonnement.

Les résultats exposés ci-dessous ont été obtenus au Laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Montpellier pendant les années 1935, 1936, 1937, 1938. M. le professeur Reboul a mis à ma disposition le matériel nécessaire et m'a prodigué ses précieux conseils. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de mes remerciements respectueux.

CHAPITRE PREMIER

MESURES DE COURANTS D'IONISATION

Comparaison des diverses méthodes
et des divers appareils : électromètres et triodes.
La chambre d'ionisation.

I

GÉNÉRALITÉS

1. Schéma théorique. — Un montage destiné à la mesure de courants d'ionisation comporte une chambre d'ionisation et un appareil de mesure. Malgré leur apparente diversité tous les montages se laissent réduire au schéma très simple suivant (fig. 1) : le courant d'ionisation i charge un condensateur C shunté par une résistance R ; l'autre armature du condensateur est au sol. C représente la somme de la capacité de la chambre d'ionisation et de celle du quadrant collecteur dans un électromètre à quadrants, du fil, ou de la feuille dans un électroscope, de la grille dans un triode. Il faut remarquer toutefois que C n'est pas toujours la capacité vraie (c'est-à-dire celle que donnerait la mesure directe de la capacité) mais que dans les appareils dont une partie est mobile par rapport aux autres (électromètres par

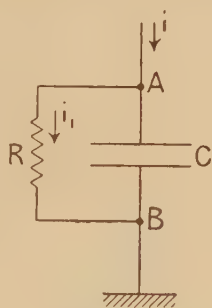


Fig. 1.

exemple); on est conduit à considérer une capacité fictive appelée capacité apparente; R représente soit une résistance mise intentionnellement, soit une résistance d'isolement. Comme l'on s'arrange en général pour que, durant une mesure, la différence de potentiel aux bornes de R varie peu, nous admettrons que dans ces conditions, R a une valeur bien définie et constante.

Désignons par i l'intensité du courant d'ionisation : c'est la donnée du problème, sa valeur est supposée demeurer constante pendant toute la mesure.

i_1 est le courant (variable) qui traverse la résistance R ; donc $i - i_1$ celui qui charge la capacité C .

Désignons par q la charge de C à l'instant t , et par v le potentiel de A .

On peut écrire tout de suite :

$$\begin{aligned} v &= i_1 R = q/C \\ i - i_1 &= dq/dt. \end{aligned}$$

Ces trois équations donnent l'équation différentielle suivante :

$$CR \, dv/dt + v = iR$$

d'où nous tirons les deux relations :

$$(1) \quad v = iR \left(1 - e^{-\frac{t}{CR}} \right)$$

$$(2) \quad dv/dt = \frac{i}{C} e^{-\frac{t}{CR}}.$$

La mesure de i se déduira soit du potentiel final $v = iR$ pris par l'armature A , soit de la vitesse dv/dt de variation de ce potentiel.

Examinons successivement ces 2 groupes de méthodes.

2. Mesure de potentiel limite v_∞ . — Il faut attendre, ainsi que le montre l'équation (1) un temps théoriquement infini

pour mesurer v . Pratiquement ce temps sera déterminé par la valeur de la constante de temps CR du circuit. Si nous cherchons comment varie la différence exprimée en o/o entre v et la valeur limite v_{∞} nous obtenons les nombres suivants :

t	1CR	2CR	3CR	4CR	5CR	
Difference $\left(\frac{v_{\infty}-v}{v_{\infty}}\right)$	100	36 o/o	13 o/o	5 o/o	1,8 o/o	0,6 o/o

Nous sommes donc conduits à attendre un temps au moins égal à $5CR$ pour faire la lecture et cela *aussi intense que soit le courant à mesurer*.

Pour fixer les idées imposons-nous de ne pas attendre plus de 30 secondes.

Il faut $5CR \leq 30$ ou $CR \leq 6$ dans le système pratique. Si nous exprimons R en ohms et C en centimètres, la valeur de R doit être telle que :

$$R \leq \frac{5 \times 10^{12}}{C}.$$

Soit alors v la plus petite valeur mesurable, la limite inférieure du courant mesurable est :

$$i = \frac{v}{R} \geq \frac{v.C}{5.10^{12}}$$

i en ampères, C en centimètres, v en volts.

2. Mesure de la vitesse de déviation dv/dt . — Cette mesure n'est possible que si dv/dt demeure constante pendant la durée de la mesure :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i}{C} e^{-\frac{t}{CR}} \sim \frac{i}{C} \left(1 - \frac{t}{CR}\right).$$

Imposons-nous les mêmes limites que précédemment, c'est-à-dire une erreur maximum de 0,6 o/o et un temps maximum de 30 secondes :

$\frac{30}{CR} \leq \frac{6}{1000}$ soit $CR \geq 5000$ secondes dans le système pratique

$$R \geq \frac{5 \times 10^{15}}{C} \text{ (R en ohms, C en centimètres).}$$

Le courant est alors : $i = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ avec $\Delta t = 30$ secondes.

La limite de i est : $i \geq \frac{C}{3 \cdot 10^{13}} \Delta v$ (i en ampères, C en centimètres, V en volts).

Toutes choses égales d'ailleurs la sensibilité est 6 fois plus grande que par la méthode précédente.

Il y a de plus une différence essentielle entre les deux méthodes : dans la première la précision théorique est d'autant plus grande que l'on attend plus longtemps ; dans la seconde que l'on attend moins longtemps. Par conséquent dans la seconde méthode la mesure des courants intenses sera plus rapide, on pourra mesurer leurs variations sans diminuer la sensibilité de l'appareil. Dans le premier cas au contraire, il faudra calculer l'appareil soit pour mesurer des courants faibles, mais alors des variations même lentes (de plusieurs secondes) ne seront pas décelables ; soit pour mesurer des courants lentement variables, mais alors on perd en sensibilité.

4. Comparaison entre l'électromètre et le triode. — Il faut d'abord noter que l'électromètre est beaucoup plus simple et plus robuste qu'un montage à triode. Une fois réglé, il est pratiquement indéréglaible et toujours prêt à fonctionner instantanément, tandis que tous les expérimentateurs insistent sur la nécessité d'attendre (au moins demi-heure) que les lampes aient atteint leur régime avant de commencer les mesures.

a) *Montages à triodes*. — Leur principal intérêt — disons même leur seule raison d'être — est, en courant continu, de permettre des mesures de courant par l'intermédiaire d'une déviation stable du spot d'un galvanomètre. Appliquons donc les calculs relatifs à la première méthode.

Avec les conventions faites, la résistance maximum à intercaler sur le circuit de grille est inférieure à $\frac{5 \cdot 10^{12}}{C}$ ohms.

Les catalogues des fabricants ne donnent pas la valeur de la capacité C de la grille : ils donnent simplement, sous le nom impropre de « capacités », la valeur absolue des coefficients d'influence « grille filament » et « grille-plaque ». Ces valeurs étant chacune de quelques centimètres ; les fils de connexion de la chambre d'ionisation ayant également une capacité voisine de 10 cm., C est voisin de 20 cm. ; R doit donc être inférieur à $3 \cdot 10^{12}$ ohms. On ne peut donc pas pratiquement utiliser un montage à « grille en l'air » dans les mesures de courants faibles par la méthode de la déviation stable.

On conçoit alors la difficulté d'ajuster et surtout de maintenir constante une résistance de l'ordre de $3 \cdot 10^{14}$ ohms. Supposant ce réglage effectué, comme la sensibilité en volts d'une lampe est de l'ordre du millivolt ⁽¹⁾, la sensibilité maximum du montage est de $i = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{12}} = 4 \cdot 10^{-15}$ ampères.

L'emploi, presque obligatoire, d'un montage en pont afin d'assurer la stabilité réduit de moitié la sensibilité soit $i = 8 \cdot 10^{-15}$ ampères. En résumé : si l'on veut mesurer avec un montage à lampes un courant faible qui peut ne pas se maintenir constant pendant un temps supérieur à 30 secondes et ce avec une précision de 10/0, on ne peut espérer une sensibilité supérieure à 10^{-14} ampères.

b) *Montages à électromètres.* — Les électromètres se divisent en deux groupes : les uns, tels les électromètres à feuilles ou à fils, ont une faible capacité mais une faible sensibilité aux volts ; les autres, dont le type est l'électromètre à quadrants, joignent à une grande sensibilité aux volts une grande capacité. Mais si l'on considère la sensibilité aux charges les deux groupes sont à peu près équivalents.

(1) Avec les résistances adoptées les fluctuations empêchent de mesurer plus du millivolt.

Je vais discuter le cas de l'électromètre à quadrants le seul que j'ai utilisé, mais les conclusions sont générales.

La capacité « apparente » d'un électromètre à quadrants est de l'ordre de 100 cm. ; en y joignant la cage d'ionisation on obtient environ 120 cm. On ne peut mesurer de faibles courants que par la méthode de la vitesse de déviation ou tout autre méthode s'y ramenant (telles les méthodes de compensation).

Sachant d'autre part que l'électromètre permet de mesurer le millivolt (1), le calcul général fait ci-dessus donne pour la sensibilité aux courants :

$$i \geq \frac{120}{3 \cdot 10^{13}} \cdot 10^{-3} \quad \left\{ \text{soit } 4 \cdot 10^{-15} \text{ ampères.} \right.$$

La sensibilité est du même ordre que dans le cas des triodes.

5. Conclusion. — La discussion précédente montre, qu'au point de vue de la sensibilité aux courants, il n'est pas possible de choisir entre l'électromètre et les triodes.

Voici d'autre part quelques inconvénients de chaque système :

1) Pour les triodes : complication du montage, longueur de la mise en train, incertitude de la fidélité de la résistance.

2) Les électromètres n'ont pas les défauts précédents mais présentent un inconvénient fort gênant : la mesure revient à celle du potentiel d'un système isolé ; or celui-ci dépend non seulement de sa charge mais des variations de position ou de potentiel des systèmes qui l'entourent. En d'autres termes, l'électromètre ne sépare pas les courants vrais des phé-

(1) Je n'examine ici que le cas d'électromètres usuels. Certains électromètres (électromètre Hoffmann dans le vide ou électromètre Compton en ajustant le contrôle négatif) permettant une sensibilité bien meilleure.

nomènes d'influence. On verra que tout le travail qui suit n'est qu'une série d'efforts pour séparer les deux phénomènes : soit après mesure, par une critique des résultats expérimentaux ; soit avant par une discussion des techniques à utiliser.

En résumé j'étais limité par la sensibilité des appareils de mesure et j'ai porté tous mes efforts sur les collecteurs de charges que je vais étudier maintenant.

II

LA CHAMBRE D'IONISATION. CONDITIONS IMPOSÉES.

FORMES ADOPTÉES

1. Lorsqu'on fait le projet d'une chambre d'ionisation il faut d'abord s'imposer deux conditions : réaliser une protection électrostatique parfaite ; prévoir un anneau de garde pour protéger l'électrode de mesure.

La première condition s'obtient généralement en entourant tout l'appareil d'une boîte métallique mise au sol. Cette restriction de mettre la boîte au sol n'est nullement indispensable, on peut avoir intérêt à fixer son potentiel à une valeur différente de celle du sol : nous en verrons un exemple ci-dessous.

Si l'on désire un montage très sensible, d'autres considérations viennent s'ajouter aux précédentes :

a) Il faut que la chambre d'ionisation ait une capacité électrostatique faible. Cette condition paraît, à première vue, peu importante lorsqu'on utilise un électromètre à quadrants. Etant donné que l'électromètre seul a environ 100 cm. de capacité, il semble peu important d'ajouter quelques centimètres. On est tout de même conduit indirectement à réaliser une capacité faible pour diminuer le coefficient d'influence mutuelle des deux électrodes. Si ce coefficient est

grand, l'appareil est très sensible aux perturbations calorifiques qui modifient la distance des électrodes ainsi que la constante diélectrique du gaz qui les sépare. Il est également très sensible à toute cause modifiant cette constante diélectrique, par exemple à l'émission de vapeur par les corps introduits dans l'appareil.

b) Pour mesurer l'ionisation spontanée de l'air on utilise des chambres contenant un grand volume gazeux. Cette ionisation est ici un effet parasite et il faut, au contraire, réduire ce volume au minimum. Ce minimum est lui-même fixé par la pénétration du rayonnement étudié.

c) Enfin il faut que tous les ions formés soient captés. Ceci suppose qu'en chaque point de la chambre le champ soit assez intense pour produire la saturation et que toutes les lignes de force amènent les ions sur l'électrode collectrice. Ci-dessous j'étudierai longuement cette condition.

d) Si malgré toutes les précautions précédentes, le courant est difficile à mesurer, on peut espérer gagner en se plaçant au voisinage de l'ionisation par chocs.

2. Chambre utilisée. Modifications successives. — Pour illustrer les considérations précédentes je vais montrer comment l'étude systématique d'une chambre simple m'a conduit à la modifier suivant les mesures à effectuer.

Sous sa forme primitive la chambre était constituée (voir fig. 2) par une boîte parallélépipédique en laiton assurant la protection électrostatique. Une cloison horizontale H, percée en son milieu d'un trou carré, joue le rôle d'anneau de garde. L'électrode supérieure E à la forme d'un U très évasé et trois vis calantes permettent de régler l'horizontalité de la face inférieure plane. L'électrode inférieure E' est portée par une vis micrométrique. Des ergots empêchant la vis de tourner, la rotation de l'écrou F déplace E' parallèlement à elle-même. Le pas de vis est de 1 mm., l'écrou est divisé en 20 parties égales, il est donc facile de donner des dépla-

cements par 1/20 de mm. Un chassis C pouvant porter différentes grilles G ou écrans peut se fixer sur E'. E' est isolé de la cage ; E est réunie par un fil rigide à l'électromètre ; les isolants sont réduits au minimum, il n'y a que les deux lames d'ambre qui supportent E. Le nettoyage est facile et l'isolement parfait. En résumé, l'appareil réduit à sa partie essentielle, est un condensateur plan d'épaisseur variable.

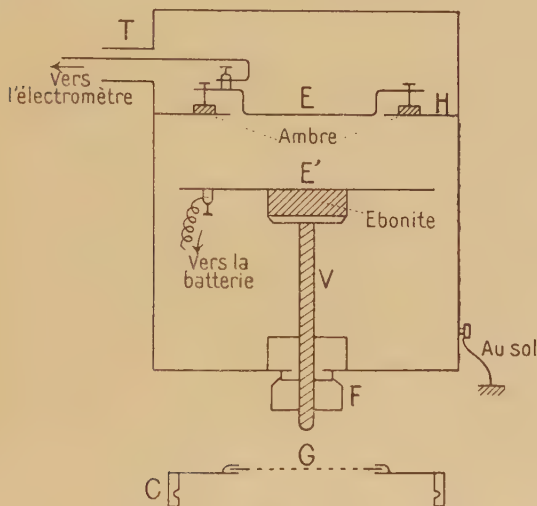


Fig. 2.

L'expérience montre qu'il est correctement construit et que la capacité varie en raison inverse de la distance des plateaux. Cette propriété me permettra de l'utiliser pour mesurer des constantes diélectriques ainsi que je l'indiquerai plus tard.

Tel que je viens de le décrire cet appareil présente de multiples inconvénients.

Afin d'être au voisinage du potentiel disruptif, il fallait réduire à une fraction de millimètre la distance des électrodes. Or, l'électrode inférieure supportait une grille à fines mailles ; celle-ci ne pouvant être plane sur un grand espace,

la distance entre l'électrode était relativement grande. Elle était cependant suffisamment faible pour que la capacité et le coefficient d'influence soient de plusieurs centaines de centimètres : l'appareil était peu sensible aux courants, très sensible aux perturbations. Il fallait donc une électrode E de faible surface. Mais si les deux électrodes sont inégales, la forme du champ électrique dans l'appareil est difficile à imaginer dans le détail et l'on ne sait si tous les ions produits sont captés.

3. Etude du champ dans le cas d'électrodes inégales. —

a) *Méthode électrolytique.* — En première approximation les lignes de force sont les mêmes dans des plans parallèles à l'un des plans de symétrie de l'appareil : on peut donc considérer celui-ci comme un système cylindrique et tout se ramène à la détermination du champ électrique dans un espace à deux dimensions. D'autre part, par suite de la même forme des équations différentielles les régissant, les lignes équipotentielles *statiques* considérées et les lignes équipotentielles *dynamiques* obtenues lorsque on remplit par un conducteur l'espace normalement occupé par de l'air et qu'on fait passer un courant, sont les mêmes. Or le tracé de ces dernières n'offre aucune difficulté.

Sur une plaque de verre j'ai représenté, à l'échelle, la coupe de l'appareil par un plan de symétrie. L'électrode collectrice et la cage d'ionisation étaient réunies à une des bornes d'un alternateur de fréquence 1 000 cycles par seconde, tandis que l'autre borne était réunie à la grande électrode. Une mince couche d'eau rejoignait les diverses parties métalliques de l'appareil. Comme la résistivité de l'eau était très grande vis-à-vis de celle du cuivre qui schématisait les électrodes ; les électrodes étaient, même pendant le passage du courant, des surfaces équipotentielles. Pour tracer les autres lignes équipotentielles on touchait les différents points du liquide à l'aide de deux sondes réunies par un téléphone. Un

papier quadrillé glissé sous le verre permettait de repérer les positions des points que l'on reportait au fur et à mesure sur une feuille identique.

Voici (fig. 3) deux exemples de familles de lignes équipotentiellles obtenues ; elles se rapportent aux deux mêmes électrodes mais placées à des distances différentes. Pour rendre le résultat plus clair, j'ai tracé en pointillé quelques lignes de force.

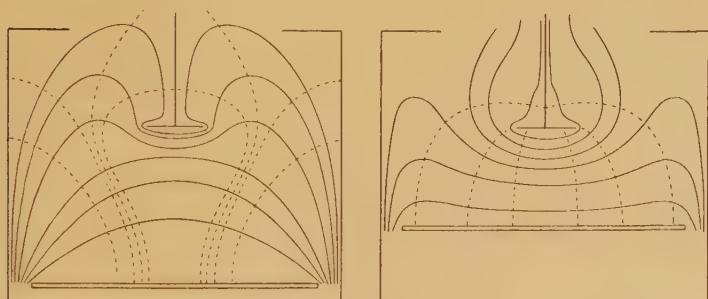


Fig. 3.

Ces figures montrent que si la distance des électrodes est faible (inférieure à deux fois la largeur de la petite électrode) presque toutes lignes de force issues de la grande électrode aboutissent à l'électrode collectrice. Au contraire pour une distance un peu plus grande (supérieure à trois fois la largeur de la petite électrode) c'est la cage qui capte presque toutes les lignes de force.

On voit l'intérêt considérable d'une telle étude ; dans le premier cas tous les ions produits sont captés par l'électrode collectrice si le champ est suffisant pour produire la saturation ; dans le deuxième cas, *aussi intense que soit le champ* la majeure partie des ions produits sera perdue. Il y a donc pour une distance d'électrodes donnée — et si l'on s'impose pour la facilité de la manipulation de maintenir au sol la protection électrostatique — une dimension minimum d'élec-

trodes. Supposons réalisée cette dimension, il reste à s'assurer qu'en chaque point le champ est suffisant : la forme des lignes équipotentielles ne suffit pas, il faut connaître la valeur du potentiel sur chacune d'elles. Cette étude est très facile à faire par la méthode électrolytique : il suffit de réunir l'une des bornes du téléphone à un potentiomètre, l'autre explorant le liquide à l'aide d'une sonde.

b) *Vérification directe.* — J'ai tenu cependant à vérifier sur l'appareil lui-même la validité des conclusions obtenues ci-dessus.

C'est au voisinage de la grande électrode que le champ est le plus faible, il s'agit de le mesurer. Or l'étude électrolytique a montré que les lignes équipotentielles sont sensiblement parallèles à la grande électrode à son voisinage. Fixons le potentiel de la grande électrode, puis isolons le quadrant de l'électromètre réuni à la petite électrode. Rien ne sera changé si nous matérialisons une surface équipotentielle. Donc le spot ne doit pas bouger si nous associons un rapprochement des électrodes à une diminution de potentiel de la grande électrode.

Voici à titre de renseignement un résultat obtenu :

Avec les électrodes employées (l'électrode collectrice ayant la forme d'une croix comme il sera expliqué plus loin) distantes de 4 mm. le champ au voisinage de la grande électrode est de 1,5 V (volts/cm.) en désignant par V la différence de potentiel entre électrodes. Ceci montre qu'il est facile d'obtenir la saturation en tous points.

4. *Etude de diverses formes d'électrodes.* — a) *Electrodes de forme carrée.* — L'étude systématique précédente a été faite en supposant le système cylindrique, c'est-à-dire s'étendant sur une grande longueur perpendiculairement au plan de symétrie. Mais comme l'appareil est à section carrée le résultat obtenu n'est probablement qu'approché. Retenons seulement la conclusion qualitative. L'électrode collectrice

doit avoir une largeur minimum égale environ à la distance séparant les électrodes, à supposer que sa longueur soit très grande vis-à-vis de sa largeur. J'ai employé au cours de ce travail, des distances d'électrodes de l'ordre du millimètre ; il aurait donc fallu que j'utilise des électrodes très étroites. Pour des raisons de rigidité et de stabilité j'ai préféré utiliser des électrodes carrées et j'ai été conduit, d'après les conclusions précédentes, à chercher la dimension minimum.

J'ai utilisé une distance entre électrodes de 2 mm., une tension de 500 volts. La grande électrode a 14 × 14 cm., la petite électrode est carrée, son côté est pris comme variable.

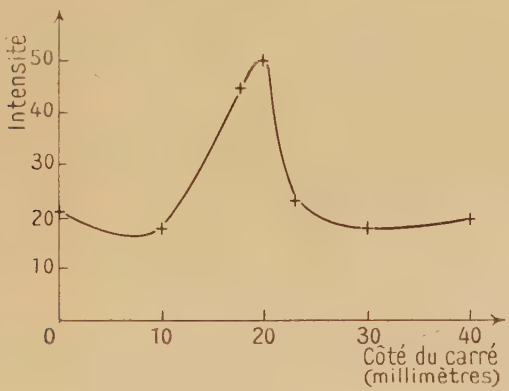


Fig. 4.

Voici les résultats obtenus :

Côté du carré (mm.)	0 (pointe	10	18	20	22	25	30	40	
Courants pour une d'aiguille)									
ionisation constante									
(unité arbitraire)		21	17	44	50	23	21	18	16

La courbe présente un maximum très aigu pour un côté de 20 mm. (fig. 4).

b) *Variations avec la forme de la surface.* — On peut essayer de réaliser cette surface optima de 4 cm² de diverses

manières : je n'ai examiné que le carré, le triangle équilatéral et le cercle.

Forme	Triangle équilatéral	Carré	Cercle
Courant.	17	50	50

Le cercle et le carré sont équivalents.

c) *Formes plus complexes.* — On peut essayer de réunir des carrés de dimensions optima en une même électrode de façon à gagner encore. Ceci revient à faire des entailles dans une électrode. Un carré de 80 mm. de côté donne un courant de 15 (mêmes unités que ci-dessus) ; en



Ftg. 5.

l'entillant de façon à séparer des carrés de 20 mm. de côté l'intensité devient 98 : plus de 6 fois supérieure. Un carré de 50 mm. de côté donne un courant de 15 ; quatre entailles formant quatre carrés de 20 mm. de côté dessinent une sorte de croix, comme le montre la figure 5. Le courant devient 300, c'est-à-dire 20 fois plus grand.

J'ai adopté cette dernière forme d'électrodes chaque fois qu'une électrode régulière n'était pas imposée. Il est bien évident que les dimensions données ci-dessus n'ont rien d'absolu et qu'on serait amené à les modifier si l'on changeait les dimensions de l'anneau de garde, la distance des électrodes ou plus généralement toute autre dimension de la chambre.

d) *Influence de la nature du métal.* — Afin de réduire le plus possible les perturbations dues aux différences de potentiel au contact et à l'effet thermoélectrique je me suis astreint à n'utiliser dans l'étude ci-dessous que des électrodes de laiton, c'est-à-dire de même nature que la cage tout entière. Toutefois pour compléter l'étude ci-dessus j'ai essayé si d'autres métaux ne seraient pas plus avantageux que le

laiton. Les résultats obtenus par J. A. Reboul ⁽¹⁾ m'ont suggéré l'emploi de l'étain.

Une électrode d'étain en forme de croix donne tout de suite après sa mise en place un courant de 600 divisions en 30 secondes. Ce courant diminue et au bout de quelques heures n'est plus que d'une vingtaine. Si on suit alors sa variation en fonction du temps par des lectures de 15 en 15 secondes poursuivies pendant 30 minutes on obtient des valeurs oscillant de façon irrégulière entre 22 et 40.

La sensibilité de cette méthode nous permet de retrouver avec un montage beaucoup plus maniable, un électromètre 5 fois moins sensible et une surface d'électrode environ 100 fois plus faible, les résultats obtenus par J. A. Reboul (*Thèse*, 17, 18) sur l'ionisation de l'air par les métaux usuels.

5. Utilisation de telles électrodes. — Il ne faut pas les utiliser dès qu'on vient de les préparer et de les mettre en place. Elles donnent des courants très intenses qui diminuent près de 100 fois en quelques heures. Elles deviennent par la suite très stables. Enfin leur pouvoir multiplicateur dépend de leur distance à l'électrode opposée. On ne peut donc comparer deux mesures qu'autant que la chambre d'ionisation est restée rigoureusement la même. Dans l'étude suivante, ce montage n'a été utilisé que pour mesurer des coefficients d'absorption, c'est-à-dire pour comparer entre elles deux ou plusieurs mesures faites avec le même diélectrique, semblablement placé par rapport à l'électrode inférieure ; mais on s'est abstenu de demander à ces mesures des renseignements sur les valeurs absolues des courants d'ionisation.

6. Perfectionnement à ces montages — Les montages précédents permettent de mesurer de très faibles courants, mais dans certains cas ils sont encore trop sensibles aux perturba-

(1) J. A. REBOUL. *Thèse Paris*, 1938.

tions calorifiques. Il faudrait encore diminuer les dimensions de la petite électrode, mais l'étude précédente montre que l'on perdrait sa sensibilité.

Si l'on se reporte à l'étude faite par voie électrolytique, on remarque que si l'électrode est trop petite, les ions sont captés par la cage protectrice. Pour aller plus loin il faut

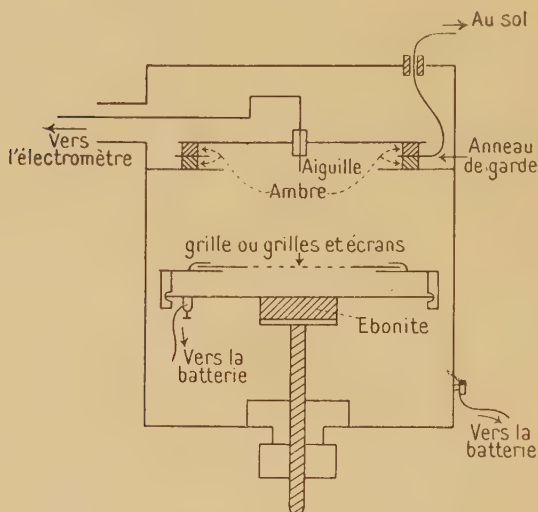


Fig. 6. — En réalité la distance de la grille à l'aiguille est, pour les mesures, au plus de quelques millimètres, et souvent même inférieure à 1 mm.

donc agir sur le potentiel de cette cage et ne plus s'imposer de la maintenir au sol. L'expérience a montré que le mieux est de lui donner le potentiel de l'électrode inférieure.

Le dispositif adopté dans ce cas est représenté figure 6. Il a fallu évidemment adjoindre un anneau de garde, la cloison n'en tenant plus lieu, si la cage n'est pas au sol.

Avec une distance grille-aiguille d'environ 2 mm. le coefficient d'influence mutuelle de la grille et de l'ensemble cage électrode inférieure n'est plus que de 2 cm. 5, soit près

de 4 fois moins qu'avec l'électrode en forme de croix. On peut donc prévoir que l'appareil sera peu sensible aux variations de température ; c'est ce que l'expérience vérifie. Une lame de plomb pesant 210 g. est chauffée à 60°, puis portée dans l'appareil ce qui constitue un apport de 250 calories. La différence de potentiel entre électrodes étant de 640 volts, le déplacement du spot n'est que deux divisions (1 division égale 1 millivolt). Il faut remarquer que de telles vérifications sont indispensables étant données les grandes chaleurs spécifiques des isolants utilisés (soufre 0,17, rhodoïd 0,4).

7. Augmentation de sensibilité par ionisation par chocs. —

Dans la technique des courants très faibles cet artifice est souvent adopté ; on se place dans le domaine précédant immédiatement l'ionisation par chocs. Ce résultat est facile à atteindre lorsqu'on peut opérer à pression réduite ; ce n'est pas le cas avec l'appareil utilisé. J'ai essayé d'arriver au potentiel disruptif sans y parvenir. Je me suis limité à 640 volts pour des raisons de stabilité (voir le paragraphe suivant), le courant obtenu est environ une fois et demie supérieur à celui obtenu avec une tension de 80 volts.

III

PRÉCAUTIONS A PRENDRE DANS LES MONTAGES ÉLECTROMÉTRIQUES SENSIBLES. DONNÉES NUMÉRIQUES

1. — Je résume ici l'observation de quelques phénomènes pouvant fausser les mesures électrométriques de courants très faibles :

a) Des vapeurs d'alcool, d'éther... peuvent donner des perturbations à l'électromètre. Cet effet est d'autant plus à craindre que la température du laboratoire est plus élevée. Des mesures faites l'été (la température étant de 25° C) ont

été faussées par l'introduction fortuite dans la chambre de bois verni ou substances poreuses ayant séjourné dans une pièce renfermant des produits chimiques.

b) Introduction dans la chambre de substances qui ne sont pas à la même température que l'air de la pièce. Cette perturbation a été examinée systématiquement afin de savoir si le frottement nécessaire à l'électrisation ne produirait pas un échauffement du diélectrique suffisant pour fausser les mesures. L'échauffement de l'air diminue sa constante diélectrique. La perturbation produite est, avec l'appareil utilisé, de sens inverse au courant d'ionisation.

c) Variation de la température de la salle pendant les mesures. Lorsque l'on utilise une tension importante pour la chambre d'ionisation, l'effet le plus à craindre est une variation de f. e. m. des accumulateurs : 1 degré la fait varier de $3 \cdot 10^{-4}$ volts par élément ; si l'on utilise, comme je l'ai fait, 640 volts soit 320 éléments, cela correspond à environ 1/10 de volt. Avec le montage utilisé cette variation produit un effet d'influence se traduisant par un déplacement du spot de 8 cm. Comme les accumulateurs ont une grande capacité calorifique, ils se mettent lentement en équilibre avec le milieu environnant et leur température peut varier pendant la mesure quoique un thermomètre qui donne la température de la salle n'accuse aucune variation. Pendant les matinées d'été on observe une dérive constante et les mesures ne sont possibles qu'à partir de 10 heures du matin quand la température des bacs s'est à peu près stabilisée.

d) On sait que toutes les expériences d'électrostatique exigent un air sec. Les mesures décrites ici n'échappent pas à cette règle. Pourtant aussi bien l'électromètre que la cage d'ionisation ont leurs isolants faciles à atteindre donc à entretenir. Il semble que la difficulté des mesures en été provient surtout d'une variation de constante diélectrique, par variation d'état hygrométrique, de l'air compris entre les armatures lorsqu'on vient d'ouvrir la cage. Le meilleur remède

consiste à laisser en permanence une lampe électrique allumée à proximité de la cage d'ionisation. Elle crée un léger excès de température sur l'air ambiant et évite la condensation de l'eau sur les parties métalliques de l'appareil.

e) Une autre difficulté est l'élimination des poils et poussières. J'ai signalé en effet que les électrodes utilisées étaient à moins de 1 mm. l'une de l'autre. Dans ces conditions, les poussières en suspension dans l'air viennent fréquemment les court-circuiter surtout quand une des électrodes est une grille à fines mailles. Le seul remède est de nettoyer à la pince. A ce point de vue également il est très pratique que l'une des électrodes soit une pointe : le nettoyage est grandement facilité.

f) Enfin, il est indispensable que les accumulateurs soient parfaitement entretenus ; il convient de ne pas les utiliser immédiatement après la charge ni dans la période de fin de décharge.

2. Données numériques. — Voici quelques valeurs relatives à l'électromètre et au montage utilisés :

1° L'électromètre utilisé est un électromètre à quadrants construit par Ch. Beaudouin. Il est stable, robuste, ne se dérègle pas et son nettoyage est facile. Il s'agit de l'utiliser au mieux. Les seules variables dont on dispose sont : la forme et les dimensions de la chambre d'ionisation ainsi que la tension de charge de l'aiguille. J'ai utilisé constamment un montage hétérostatique : une paire de quadrants est au sol, l'autre est réunie à une électrode de la chambre d'ionisation.

2° Influence de charge de l'aiguille.

Si l'on fait croître la charge de l'aiguille on augmente la sensibilité aux potentiels, mais comme simultanément ⁽¹⁾ on

⁽¹⁾ On trouvera la théorie de l'électromètre à quadrants dans : MOULIN. *Le Radium*, 4 (1907), 145 ; DARBORD. *Annales de Physique*, 13 (1930), 471-563 ; HOFFMAN. *Phys. Zeits.*, 25 (1924), 6 ; WOLF. *Annalen der Physik*, 18 (1933), 373 ; L. T. POKMAN. *Rev. of Sc. Inst.*, 7 (1936), 238.

augmente la capacité apparente de l'électromètre on comprend qu'il y ait une tension optima donnant la meilleure sensibilité aux charges et aux courants. Si la capacité de la chambre d'ionisation est de quelques dizaines de centimètres, la tension optima est voisine de 80 volts ; c'est celle que j'ai adoptée. Voici dans ces conditions les caractéristiques de l'électromètre utilisé :

Capacité apparente de l'électromètre : $35 + 1,05/100 V^2$
(pour $V = 80$ volts $C = 102$ cm.).

Sensibilité aux potentiels : 1 mm. d'échelle $= 1,2 \cdot 10^{-3}$ volt.

Sensibilité aux charges : 1 mm. d'échelle $= 2,06 \cdot 10^{-13}$ coulomb ou $1,3 \cdot 10^6 e$.

L'échelle était à 1 m. 40 du miroir.

Les courants étant mesurés par la méthode de la vitesse de déviation on voit que : un déplacement du spot de 1 mm. par minute correspond à une intensité de $3,4 \cdot 10^{-15}$ ampères.

CHAPITRE II

Etude expérimentale de quelques particularités présentées par les diélectriques solides.

Avant-propos. — La théorie classique des diélectriques solides a été faite par Gaugain, Hopkinson, J. Curie et Malclès. Je rappellerai ci-dessous les résultats obtenus qui sont la base de toute étude sur les diélectriques.

Plus récemment les physiciens se sont spécialisés. Suivant les tendances actuelles, beaucoup ont cherché dans leurs études un moyen d'atteindre la structure des molécules : ils se sont limités à la mesure aussi précise que possible des constantes diélectriques (principalement dans le cas des liquides). On trouvera dans Errera ⁽¹⁾ et Smyth ⁽²⁾ l'exposé des méthodes et des résultats de cette branche. D'un esprit tout autre sont les mesures des techniciens qui ne cherchaient qu'à déterminer les valeurs de paramètres (tension de claquage, angle de perte) nécessaires à l'utilisation industrielle de formules empiriques. Mais comme pour les premiers il s'agissait d'étudier successivement des corps particuliers, de telle sorte que l'étude générale des propriétés des diélectriques fut faite par d'autres physiciens : les uns étudiant le mécanisme de la conductibilité (ionique ou électronique, un ou deux ions ⁽³⁾) les autres examinant le mécanisme de

⁽¹⁾ ERRERA. *Polarisation diélectrique*. Paris (1928).

⁽²⁾ SMYTH. *Dielectric constant and molecular structure*, New-York (1931).

⁽³⁾ J. J. SAMMER. *Physik, Zeitschrift*, 35 (1934), 29.

l'électrisation par frottement ⁽¹⁾ enfin M. Reboul fut conduit par la nature de ses recherches à s'occuper d'un chapitre non exploré : le mode de décharge des diélectriques électrisés par frottement. M'ayant accueilli dans son laboratoire M. Reboul m'a demandé de reprendre et d'approfondir certains de ses travaux ⁽²⁾. L'absence presque absolue de physiciens travaillant sur ce sujet explique le peu de références données dans cet exposé. On y renvoie, à part le travail déjà cité de M. Reboul, presque exclusivement à un mémoire de M. Eichenberger ⁽³⁾ dont les conclusions contredisent celles de M. Reboul.

I

LOIS RÉGISSANT LES DIÉLECTRIQUES

1. — Je crois nécessaire d'insister assez longuement sur les lois qui régissent les diélectriques car, si elles sont simples leur application est extrêmement délicate. J'essaierai dans les lignes qui suivent de montrer comment on peut surmonter ces difficultés et de préciser certains ordres de grandeurs qui, méconnus, conduisent à faire des raisonnements mathématiquement irréprochables mais physiquement erronés.

Au point de vue électrique, un diélectrique est un corps très mauvais conducteur (mais conducteur tout de même) qui, dans un champ électrique, se polarise. Nous allons examiner successivement ces deux propriétés.

2. Conductibilités d'un diélectrique. — On est obligé de considérer 3 conductibilités pour un diélectrique :

(1) P. A. MAINSTONE. *Philosophical Magazine*, 8 (1929), 733 ; E. HESS. *Zeitschrift für Physik*, 78 (1932), 430.

(2) M. REBOUL. *Loc. cit.*

(3) EICHENBERGER. *Helvetica Physica Acta*, 9 (1936), 487.

a) Conductibilité superficielle.

b) Conductibilité massique.

c) Conductibilité du contact diélectrique-métal.

a) *Conductibilité superficielle.* — Cette quantité la plus grande des trois dépend énormément de l'état de propreté et de sécheresse de la surface. Un nettoyage méticuleux et la manipulation en lieu sec diminue beaucoup sa valeur. Leiste ⁽¹⁾ indique pour l'ambroïne sèche une résistivité superficielle d'environ $6 \cdot 10^{-10}$ ohms/cm. Cette valeur n'est pas très grande. Nous en verrons (p. 49) une conséquence importante : les charges se déplaçant à la surface des diélectriques si les lignes de force du champ électrique sont inclinées sur la surface.

b) *Conductibilité massique.* — En l'absence de rayons X ou de lumière ultra-violette cette quantité est excessivement faible (non mesurable disent pour certains corps, tel que le soufre, les Recueils de constantes) mais les expériences de Gaugain puis de Malcès ont montré qu'elle *était finie* et que les diélectriques tendaient vers le même état d'équilibre que les métaux : celui qui annule le champ électrique à leur intérieur.

c) *Conductibilité du contact diélectrique-métal.* — Cette quantité est probablement inférieure à la précédente ; pour des champs même intenses elle peut être considérée comme infiniment petite. Le fait suivant le prouve ⁽²⁾ : on peut conserver un isolant chargé durant des mois en l'enveloppant d'une feuille métallique d'étain ou d'aluminium.

Pour terminer ces quelques indications je rappellerai une expérience d'une importance *théorique* trop souvent oubliée. Elster et Geitel ⁽³⁾ dans des expériences historiques ont mesuré la conductibilité de l'air avec un électroscope *sans*

(1) LEISTE. *Zeitschrift für Physik.*, 62 (1930), 646.

(2) THIESSEN, WINKEL et HERMANN. *Physik. Zeits.* (1936-37), 511.

(3) ELSTER et GEITEL. *Annalen der Physik*, 2 (1900), 425.

anneau de garde. Il en résulte que, même dans les conditions normales, la conductibilité de l'air est grande vis-à-vis de celle des diélectriques. D'une façon générale un raisonnement considérant implicitement comme nulle la conductibilité de l'air ne peut être qu'approché : il est systématiquement faux si, simultanément à l'omission précédente, on tient compte de la conductibilité du diélectrique.

3. Polarisation des diélectriques. — Placé dans un champ électrique un diélectrique se polarise dans le sens du champ. On admet qu'il se développe à l'intérieur du diélectrique des charges (que généralement on appelle « fictives » par opposition aux charges « réelles » développées par frottement) il se forme de petits doublets dont le moment électrique est proportionnel à la valeur du champ en ce point lorsque l'équilibre est établi. On formule cette propriété par $I = kP$ (I = moment par unité de volume, P = intensité du champ électrique k = susceptibilité diélectrique).

Les phénomènes d'hystérésis viennent considérablement compliquer cette propriété, bien que la loi suivant laquelle se produisent ces phénomènes soit connue. On la désigne sous le nom de principe de superposition.

4. Principe de superposition. — Ce principe comporte en réalité deux parties bien distinctes qu'il vaut mieux séparer.

1° Dans une première partie ce principe affirme l'indépendance des causes agissant sur un diélectrique : chacune agit comme si elle était seule.

2° La deuxième partie du principe précise le rôle du temps : une cause n'agit pas seulement au moment où elle se produit, son action se prolonge mais va s'affaiblissant à mesure que le temps s'écoule. On tient compte de cet affaiblissement en introduisant un facteur $\varphi(t)$ (facteur d'oubli) dans la loi qui précise la relation « cause-effet ». Si, au temps zéro nous soumettons le diélectrique à un champ P_0 que nous main-

tenons constant, l'action de ce champ au temps t sera $kP_0\varphi(t)$ et l'effet subi par le diélectrique sera, d'après la première partie du principe, la somme des effets subis depuis le temps 0 jusqu'au temps t ; autrement dit, la polarisation au temps t sera :

$$I = \int_0^t kP_0\varphi(t)dt = kP_0 \int_0^t \varphi(t)dt.$$

Quant à la fonction $\varphi(t)$, le principe ne lui impose que d'être une fonction décroissante de t , s'annulant quand t devient infini. En général une cause « finie » agissant même pendant un temps infini, produit un effet fini : donc l'intégrale doit tendre vers une limite finie quand t tend vers l'infini. Il en résulte que si l'on choisit pour $\varphi(t)$ un développement limité de la variable $(1/t)$; il n'y aura pas en général de terme $1/t$ qui par intégration donnerait un logarithme.

5. Difficultés rencontrées dans l'application de ce principe.

— Une première difficulté résulte du fait que la fonction $\varphi(t)$ est inconnue *a priori* ⁽¹⁾ : il faut pour chaque diélectrique déterminer la forme de $\varphi(t)$ et choisir une formule empirique. Avant d'expérimenter on ne peut rien dire, ce qui restreint singulièrement l'importance pratique de ce principe.

Autre difficulté : quelle valeur prendre pour k ? Dans un diélectrique sans hystérésis la susceptibilité diélectrique k est liée à la constante diélectrique K par la relation $K = 1 + 4\pi k$ et K est déterminé par des mesures de capacités. Si l'on fait cette détermination pour un diélectrique à hystérésis, il faut attendre que l'état d'équilibre soit établi, on a donc $K = 1 + 4\pi k(1 + \int_0^t \varphi(t)dt)$. Cette relation montre combien il est difficile de déterminer les paramètres nécessaires.

(1) Industriellement on pose $\varphi(t) = Bt^{-m}$ avec $m < 1$, mais cette formule empirique n'est pas valable au début du phénomène, c'est-à-dire dans le domaine qui nous intéresse.

Enfin, pour appliquer le principe de superposition, il faut *connaître à chaque instant* la valeur du champ à l'intérieur du diélectrique. Or cette valeur varie avec la polarisation de sorte qu'on ne la connaît généralement pas. A part le cas où le champ est maintenu constant, c'est-à-dire où le diélectrique occupe tout l'espace compris entre les armatures d'un condensateur et où la différence de potentiel entre les armatures est maintenue constante, tout essai d'application de ce principe conduit à un système d'équations fort compliqué par suite de la présence du signe $\int$ dans l'une des relations.

6. Forme graphique du principe. Méthode de J. Curie. — Il est par contre extrêmement simple de généraliser la

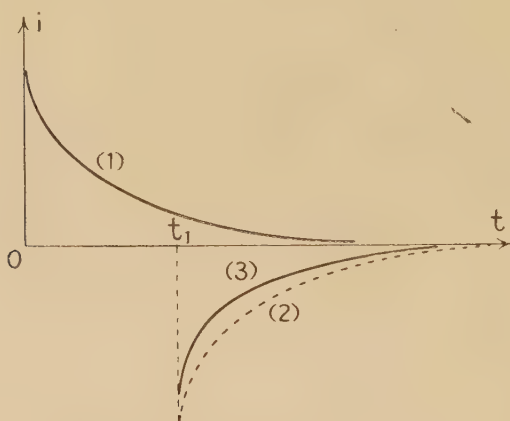


Fig. 7. — Diélectrique non conducteur.

méthode utilisée par J. Curie ⁽¹⁾ et de résoudre graphiquement les problèmes. Voici d'abord un exemple simple qui montrera l'application de la méthode.

⁽¹⁾ J CURIE. *Thèse Paris* (1888).

On place entre les armatures d'un condensateur quelconque un diélectrique *non conducteur*. Ce diélectrique est placé de façon quelconque entre les armatures qu'il remplit ou non et l'on veut savoir ce qui se produit si l'on polarise dans un sens puis dans l'autre d'une façon arbitrairement choisie.

Avant de répondre à cette question, il faut faire une mesure *mais une seule* sur le dispositif lui-même : on choisira évidemment la plus facile à exécuter (Remarquons que si l'on voulait traiter mathématiquement la question, cette mesure serait obligatoire pour déterminer le facteur d'oubli). On prendra le diélectrique à l'état vierge, on appliquera aux électrodes une tension E_1 quelconque, on notera le courant en fonction du temps. On obtiendra par exemple la courbe ci-contre (fig. 7, courbe 1) qui doit tendre vers zéro puisque le diélectrique choisi n'est pas conducteur. La connaissance de cette courbe suffit. Si l'on avait appliqué une différence de potentiel E_2 au temps 0 toutes les ordonnées de la courbe auraient été multipliées dans le rapport $\frac{E_2}{E_1}$.

La décharge se déduit facilement de la charge : en effet, réunir les deux électrodes, revient à ajouter à E_1 une tension $-E_1$; si l'on a attendu pour décharger que la charge soit terminée la courbe de décharge sera au signe près, égale à la courbe de charge. Si au contraire on avait déchargé à partir du temps t_1 il est facile de tracer *a priori* la courbe correspondante. Sur la figure 7, (1) est la courbe de charge ; (2) (en pointillé) est la courbe de décharge qui succéderait à une charge complète ; cette courbe est tracée à partir du temps t_1 comme origine. La courbe que donnerait l'expérience est la courbe (3) somme des courbes (1) et (2).

On traiterait de la même façon le cas où la tension appliquée varie de façon quelconque avec le temps.

Si le diélectrique est conducteur le problème peut se traiter de la même manière à condition qu'il ne remplisse pas

tout l'intervalle compris entre les électrodes (condition non imposée dans le cas précédent). Cette disposition est celle qui sera adoptée dans le travail expérimental suivant. La figure 8 donne avec les mêmes notations que ci-dessus la

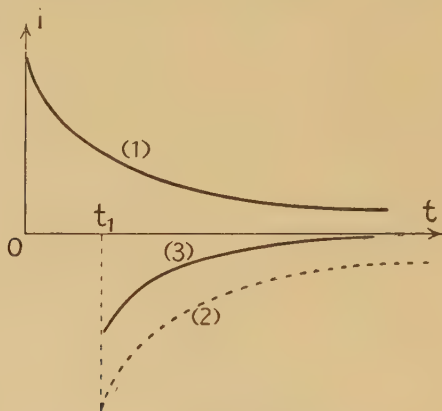


Fig. 8. — Diélectrique conducteur.

charge et la décharge, après charge incomplète, d'un condensateur comprenant entre ses électrodes de l'air et un diélectrique.

II

EXPÉRIENCES FAITES EN PLAÇANT LE DIÉLECTRIQUE DANS UNE CHAMBRE D'IONISATION

1. — Dans cette partie j'ai repris les mesures de M. Reboul afin de m'assurer si les propriétés connues des diélectriques (conductibilités et hystérésis) ne suffisaient pas à expliquer les phénomènes observés.

L'appareil qui m'a servi est celui précédemment utilisé

par M. Reboùl ⁽¹⁾. Il se compose essentiellement de deux plateaux parallèles, le plateau inférieur fixe est réuni à l'électromètre; le plateau supérieur mobile peut se déplacer de façon à modifier l'intervalle qui le sépare du premier. Une cage au sol assure une protection électrostatique parfaite. Afin d'éviter toute différence de potentiel au contact, ainsi que toute différence de potentiel thermoélectrique, l'appareil est entièrement construit en laiton. L'expérience consiste à placer sur le plateau inférieur une lame diélectrique électrisée et à noter les perturbations à l'électromètre. Cette étude se divise en deux parties : A) Il n'y a pas de champ ; B) Il y a un champ auxiliaire.

I

A) EXPÉRIENCES SANS CHAMP AUXILIAIRE

1. — Le plateau supérieur est mis au sol et le plateau inférieur, réuni à l'électromètre peut, lui aussi, être considéré comme au sol car on le remet au sol chaque fois que son potentiel atteint quelques dixièmes de volt.

2. Précautions expérimentales. — Si l'on ne précise pas davantage les conditions expérimentales il est possible d'obtenir des résultats à peu près quelconques. L'hystérésis des diélectriques est, en effet, une gêne sérieuse car les champs électrostatiques dus aux charges de frottement sont grands. De plus l'expérience oblige à déplacer la lame chargée par rapport à des conducteurs au sol pour l'amener de l'endroit où on l'a chargée jusque dans la chambre d'ionisation. Il est donc indispensable de s'imposer des règles rigoureuses afin d'obtenir des résultats comparables.

(1) M. G. REBOUL. *Loc. cit.*, 330

En plus de conditions usuelles de propreté, de sécheresse d'équilibre thermique du diélectrique avec le milieu environnant, je n'ai expérimenté qu'avec des lames neutres depuis plusieurs heures. Toutes les lames étaient marquées afin d'être électrisées toujours sur la même face et d'être placées toujours de même façon dans la chambre d'ionisation. *Les lames à électriser étaient placées le plus près possible de la chambre sur un plan de laiton mis au sol.* Je les électrisais avec de la soie artificielle, successivement dans deux directions rectangulaires. Je les plaçais ensuite sur le plateau inférieur de la chambre *en tournant vers le haut la seule face électrisée.*

Toutes ces précautions se sont montrées suffisantes. En effet si on électrise les lames le plus possible, les courbes obtenues dans deux expériences effectuées dans les mêmes conditions atmosphériques (température et sécheresse de l'air) peuvent être superposées par une translation parallèle à l'axe des temps. Ce résultat est déjà intéressant : il montre que l'*électrisation limite* d'un diélectrique est une constante fonction des conditions atmosphériques mais indépendante de la façon dont on l'a électrisé. Mainstone ⁽¹⁾ a trouvé le même résultat pour les métaux. Ce *résultat est inexplicable* pour la théorie classique des diélectriques car on est obligé de faire intervenir l'air, en admettant qu'il y a déperdition par l'air qui limite supérieurement la densité superficielle obtenue par frottement.

3. Résultats obtenus. — Voici deux résultats obtenus avec la même lame d'ambre. La première mesure est relative à une électrisation faible de la lame d'ambre. L'intensité du courant est exprimée en unités arbitraires la valeur 100 correspondant à peu près à $4 \cdot 10^{-13}$ ampère.

⁽¹⁾ MAINSTONE. *Philosophical Magazine*, 8 (1929), 733 ; 16 (1933), 1083 ; 19 (1935), 278.

A cette mesure correspond le tableau ci-dessous et la courbe I, figure 9.

<i>t</i> minutes	0	2	3	4	5	6
Intensité	+ 100	+ 44	+ 29	+ 20	+ 16	+ 12
<i>t</i> . . .	8	10	15	30	60	120
<i>I</i> . . .	+ 10	+ 7	+ 4	+ 1	— 5	+ 12

Pour la deuxième mesure la lame avait été électrisée beaucoup plus énergiquement : l'intensité est exprimée avec la même unité que ci-dessus. Les valeurs beaucoup plus gran-

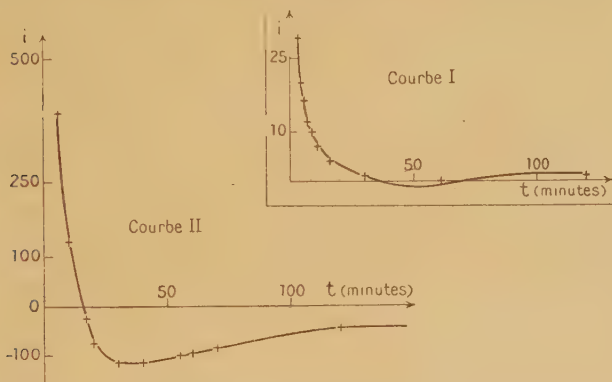


Fig. 9. — L'échelle des intensités est 10 fois plus grande pour I que pour II.

des obtenues ont obligé à choisir pour la courbe II (fig. 9) représentant cette mesure une échelle beaucoup plus réduite, il a été cependant impossible de représenter à l'échelle les valeurs des trois premières minutes.

<i>t</i>	0	1	3	6	10	16
<i>I</i>	+ 3 040	+ 2 080	+ 1 050	+ 390	+ 130	— 32
<i>t</i>	20	24	30	35	40	55
<i>I</i>	— 73	— 100	— 115	— 122	— 122	— 107
<i>t</i>	60	70	90	120		
<i>I</i>	— 101	— 90	— 70	— 52		

Enfin 24 heures après le courant est encore mesurable et égal à + 3.

Il faut remarquer que ces mesures ne sont pas isolées ; elles font partie d'une série de mesures ayant donné des résultats voisins. Je les ai choisies comme représentants les deux cas extrêmes d'électrisation : très forte ou faible. On voit que ces deux courbes sont, à l'échelle près, très analogues. Des isolants divers comme le soufre ou l'ébonite ont également donné le même résultat.

4. Interprétation des résultats. — Il faut d'abord vérifier si la théorie classique des diélectriques suffit à expliquer les résultats. Cherchons donc à les interpréter par la conductibilité et l'hystérésis. Pour traiter complètement cette question il faut connaître, à chaque instant, l'intensité et la direction du champ à l'intérieur du diélectrique. L'intensité nous étant inconnue, il ne peut être question que d'un raisonnement qualitatif ; prenons comme sens positif du champ dans la lame la verticale dirigée vers la face supérieure et suivons les modifications successives imposées au diélectrique.

a) Etat initial : champ nul.

b) Electrification sur plan au sol : la face supérieure prend une charge négative de plus en plus grande ; le champ est positif et de plus en plus intense.

c) Transport dans la chambre : ce transport revient à approcher de la lame un plan conducteur au sol depuis l'infini jusqu'à une distance égale à l'intervalle « isolant-plaque supérieure » dans la chambre. Ce déplacement fictif a pour effet de diminuer l'intensité du champ sans changer son sens.

Représentons graphiquement ces diverses modifications en fonction du temps (fig. 10, courbes I, II, III).

La courbe I en traits pleins, représenterait les variations du champ s'il n'y avait pas d'hystérésis.

Nous aurions :

OA, électrisation du diélectrique (le champ croît).

AB, décroissance rapide quand on enferme le diélectrique.

En B (temps t_0) commence la mesure : s'il n'y avait pas hystérésis le champ diminuerait constamment sous l'influence

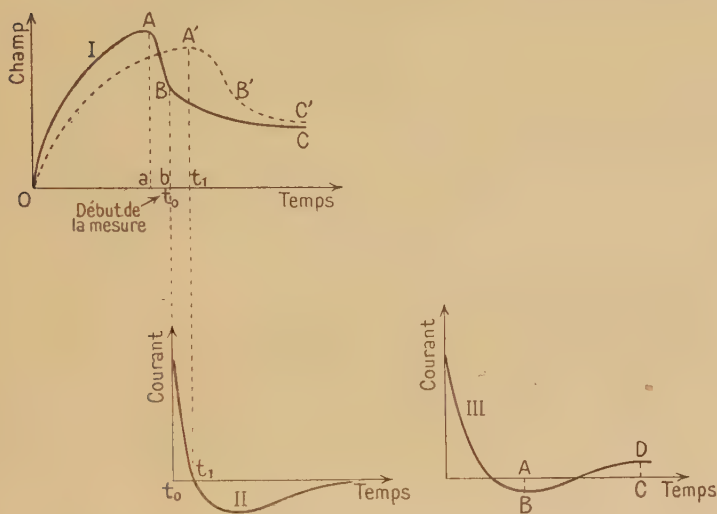


Fig. 10.

I. — *Trait plein* : variations du champ à l'intérieur du diélectrique s'il n'y avait pas hystérésis.

Trait pointillé : il y a hystérésie.

La figure est déformée pour être plus claire, en réalité :
 $aA = 1,3 bB$.

II. — Forme de courant s'il n'y avait que l'hystérésie : en t_1 , correspondant à A' il y a inversion.

III. — Forme d'une courbe réelle : il y a deux inversions.

L'échelle des temps de III est 10 fois plus petite que celle de II.

des pertes dues à la conductibilité de l'air et du diélectrique. L'influence sur l'électromètre serait de sens constant ; il n'y aurait pas inversion. Il y a hystérésis c'est-à-dire retard ; la courbe véritable (trait pointillé) est déportée vers la droite.

Si le retard est assez grand le maximum A' peut avoir une abscisse supérieure à celle de B.

Pendant la mesure le champ croîtra d'abord puis décroîtra. Le courant variera suivant la courbe II. L'hystérésis explique donc une inversion. Montrons que ce raisonnement ne convient pas pour expliquer les inversions constatées (courbe III) : d'abord il y a deux inversions, mais la première inversion constatée n'est pas quantitativement explicable par l'hystérésis. En effet elle se produit au bout d'un temps long : 50 minutes par exemple pour la courbe donnée ; si les retards étaient aussi longs les diélectriques ne se polariseraient pas en courants alternatifs industriels ; non seulement les isolants ne s'échaufferaient pas, comme ils le font, mais encore les capacités des condensateurs seraient indépendantes de la nature des diélectriques.

L'inversion expliquée par l'hystérésis se produit au bout d'un temps trop court pour être mesurable. On peut donc considérer que pendant la durée de la mesure, l'hystérésis donne un courant de sens constant et il faut chercher une cause inverse.

5. Explication proposée par M. Reboul ⁽¹⁾. — Supposons une lame chargée négativement comme la plupart de celles que j'ai étudiées.

Le champ créé par le diélectrique est (fig. 11) dans l'air dirigé de haut en bas. Il amène vers l'électrode supérieure des charges négatives. Cet effet est de sens opposé à ceux dus à la polarisation et à l'hystérésis du diélectrique. Sous l'action de ces deux effets contraires la déviation peut être tantôt dans un sens tantôt dans l'autre. Au début l'action de la polarisation est intense : le courant est positif. Ensuite le courant d'ionisation l'emporte. Mais ce courant est amplifié par ionisation par chocs ; il diminue donc beaucoup plus

(1) M. G. REBOUL. *Loc. cit.*, 331.

vite que le champ et au bout d'un certain temps l'effet de polarisation reprendra le dessus. Quant au courant de conductibilité du diélectrique, il est certainement négligeable vis-à-vis des autres. En effet la possibilité de mesurer la conductibilité de l'air avec un électroscope sans *anneau de garde* (Elster et Geitel) montre que la conductibilité d'isolants tels que l'ambre, le soufre est certainement négligeable vis-à-vis de celle de l'air.

M. Reboul complète son hypothèse en ajoutant que l'ionisation de l'air n'est pas son ionisation normale, mais qu'elle est accrue par une action

ionisante due à la décharge du diélectrique. Cherchons si cette deuxième partie de l'hypothèse est indispensable. Il faut pour cela évaluer l'intensité du courant d'ionisation. D'après l'hypothèse faite le courant observé est la différence entre le courant de polarisation et le courant d'ionisation, au temps t_1 le courant d'ioni-

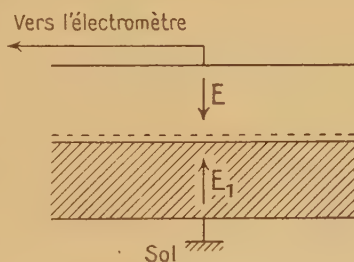


Fig. 11. — Cage d'ionisation : sens des champs dans l'air et dans le diélectrique.

sation l'emporte, au temps t_2 c'est la polarisation. Il en résulte qu'une valeur approchée du courant d'ionisation est (fig. 11, courbe III) $AB + CD$, cette valeur étant d'ailleurs approchée par défaut, sur la courbe donnée cela correspond environ à 10^7 charges élémentaires à la minute et comme le volume d'air surmontant le diélectrique est voisin de 100 cm^3 cela fait un nombre d'ions supérieur à 1 000 par cm^3 et par seconde, 500 fois plus que l'ionisation spontanée de l'air. Une première cause de multiplication est certainement l'ionisation par chocs. Il est facile de le vérifier en augmentant dans un rapport connu le nombre d'ions par centimètre cube à l'aide du rayonnement γ d'un sel radioactif. Une expérience

préliminaire donne le courant de saturation correspondant, donc le nombre d'ions formés par centimètre cube et par seconde soit 5 000. En présence d'ambre le courant observé est environ 5 fois plus grand que le courant de saturation. Tenant compte de cette multiplication le nombre d'ions est ramené à 200 ce qui est encore beaucoup plus que le nombre normal. Si donc on admet l'explication proposée l'étude quantitative conduit à ajouter, avec M. Reboul, que le diélectrique dans sa décharge ionise l'air qui l'entoure.

II

B) EXPÉRIENCES AVEC CHAMP AUXILIAIRE

1. — Nous avons vu que l'explication proposée par M. Reboul s'appuyait sur la remarque suivante : le champ dans l'air a un sens tel que le courant d'ionisation qu'il produit s'oppose aux perturbations dues à l'hystérésis. Il était naturel d'essayer d'agir sur ce courant en agissant sur le champ qui le produit. Les perturbations constatées (désignées par M. Reboul ⁽¹⁾ sous le nom de deuxième anomalie) vont être analysées maintenant.

L'appareil est le même que dans l'étude précédente, mais le plateau supérieur de la chambre, au lieu d'être au sol, sera porté à un potentiel variable positif ou négatif.

Au cours des mesures le diélectrique se trouvera soumis à des champs électriques de sens et d'intensités variables. Il s'ensuivra des perturbations à l'électromètre. Celles-ci ont été maintes fois étudiées ⁽²⁾ sur des *isolants non électrisés* et ont conduit au « principe de superposition ». L'objet de cette étude est de savoir si ce principe s'applique aux isolants élec-

(¹) M. G. REBOUL. *Loc. cit.*, 332.

(²) M. CLEERY. *Philosophical Magazine*, 15 (1933), 223.

trisés c'est-à-dire d'essayer par une nouvelle expérience si l'hystérésis est la cause unique des effets constatés.

2. **Expériences.** — J'ai d'abord repris le mode opératoire de M. Reboul. On commence à suivre la désélectrisation entre plateaux au sol un temps suffisant pour pouvoir extrapoler la courbe. Au bout de 10 minutes on impose au plateau supérieur le potentiel de 240 volts qu'on laisse un temps suffisant, 15 minutes par exemple, au bout desquelles on le supprime 10 nouvelles minutes et ainsi de suite. On trouve ainsi une série de valeurs telles que :

Temps :	0,5	1	1,5	2	3	4	5	8	On met le champ
Intensité .	+ 1 000	600	485	342	246	177	132	73	
<i>t.</i> . . .	10	11	13	15	20	22	24		On le supprime
<i>i.</i> . . .	+ 87	65	53	43	29	22	21		
<i>t.</i> . . .	25	26	28	30	32	33			On le remet
<i>i.</i> . . .	- 28	0	+ 5	+ 4	+ 4	+ 4			
<i>t.</i> . . .	34	35	36	38	40				
<i>i.</i> . . .	+ 55	28	14	9	8				

Ces valeurs donnent différents tronçons de courbes et on voit nettement (fig. 12) que les tronçons sans champ sont tangents à une même courbe ; les tronçons avec champ à une courbe différente de la première. La différence de ces deux courbes représenterait la variation du courant d'ionisation dûs à la variation du champ.

Ces expériences ont été critiquées par M. Eichemberger⁽¹⁾. Il semble d'abord que M. Eichemberger n'ait pas vu que l'on traçait en quelque sorte les *courbes asymptotes* aux divers tronçons. La critique la plus fondée *en apparence* consiste à mettre en doute les extrapolations proposées. Une extrapolation présente toujours une certaine indétermination et il

(1) EICHEMBERGER, *Loc. cit.*, 487.

est facile de prétendre qu'elle est faite suivant des idées préconçues. Pour retirer cet argument j'ai modifié le mode opératoire en faisant un usage systématique du principe de superposition que M. Eichemberger nous reproche de négliger. Il s'agira de décider si des points appartiennent ou n'appartiennent pas à la même courbe. De plus j'ai été conduit à utiliser des potentiels plus intenses afin que les champs

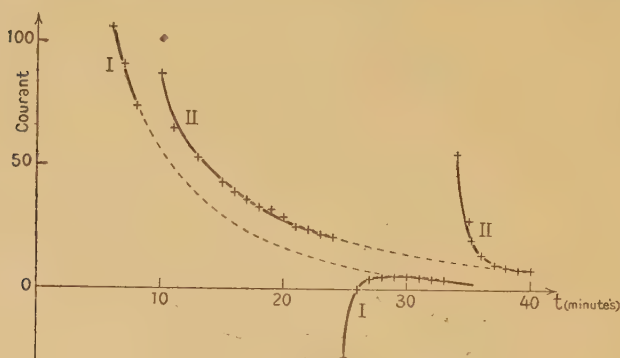


Fig. 12. — Dans les tronçons de courbe I
il n'y a pas de champ auxiliaire.

Dans le tronçon II, il y a un champ auxiliaire.

Les lignes pointillées correspondent à des extrapolations.

qu'ils créent aussi bien dans l'air que dans l'isolant expérimenté soient comparables à ceux dûs à la charge de frottement.

3. Marche d'une expérience. — 1° Une étude préliminaire indique comment varie avec le temps le courant électrométrique quand on place l'isolant *non électrisé* dans la chambre puis qu'on porte brusquement à $V = -640$ volts le plateau supérieur.

t.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
l.	-70	-47	-36	-27	-23	-20	-18	-16	-14	-13,5

Ces résultats sont représentés par la courbe 1 (fig. 13).

2° Après avoir remis le plateau supérieur au sol et attendu un temps assez long pour que toute perturbation à l'électromètre ait cessé on sort l'isolant, l'électrise par frottement, le remet dans la chambre. On note les divisions de minute en minute pendant un temps assez long (40 minutes par exemple) pour pouvoir tracer la courbe avec certitude. C'est l'ex-

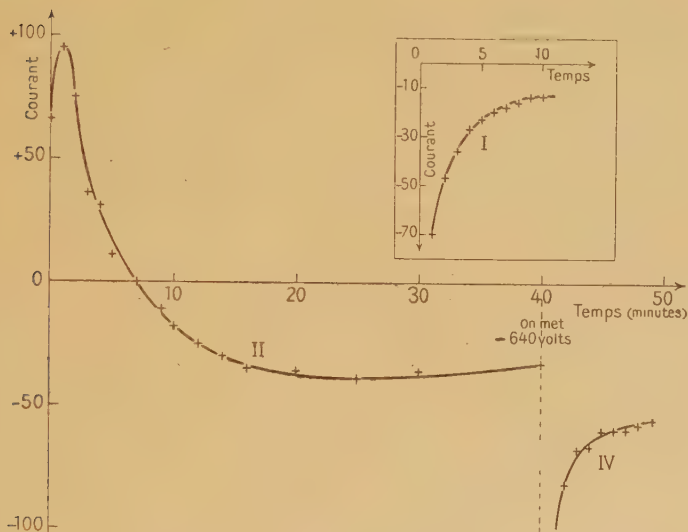


Fig 13. — Action du champ sur le diélectrique non électrisé.

périence du chapitre précédent que l'on recommence. Les résultats obtenus ont été les suivants :

t	0	1	2	3	4	5	7	9	10
l	+66	+95	+75	+36	+31	+11	0	-11	-18
t	12	14	16	20	25	30	39		
l	-25	-30	-35	-36	-39	-37	-33		

Ils sont représentés par la courbe (II).

3° A la 40^e minute (dans l'expérience prise comme exem-

ple) on porte à — 640 volts le potentiel du plateau supérieur et l'on note le courant :

t . . .	41	42	43	44	45	46	47	48	49
l . . .	— 114	— 129	— 104	— 94	— 84	— 71	— 78	— 74	— 70

Pour rendre la figure plus claire je n'ai pas reporté ces points, pour la brièveté du langage je les désignerai par courbe (III).

Appliquons le principe de superposition. — L'effet obtenu dans cette troisième partie de l'expérience doit être la superposition de la courbe (II) extrapolée et de l'action du champ sur le diélectrique non électrisé (courbe I). Afin d'éviter l'imprécision d'une extrapolation je renverse le raisonnement. Si de la courbe (III) je retranche les ordonnées de la courbe (I) tracée à partir du moment où j'établis le champ ($t = 40$). J'obtiens les points suivants :

t . . .	41	42	43	44	45	46	47	48	49
l . . .	— 144	— 82	— 68	— 67	— 61	— 60	— 60	— 58	— 56

Ces points constituent la courbe numérotée (IV).

Si le principe de superposition expliquait tout le phénomène la courbe IV prolongerait la courbe (II) : tous les points de IV (et pas seulement les points limites) continueraient les points de la courbe II.

Le graphique montre de façon irréfutable combien cette conclusion est erronée.

4. *Interprétation des résultats.* — Il ne peut être question de rejeter le principe de superposition si souvent vérifié ; il paraît plus raisonnable de le compléter. Montrons qu'en lui associant l'hypothèse de M. Reboul l'expérience précédente s'interprète correctement. Calculons le champ E_2 dans l'air surmontant le diélectrique. Désignons par E_1 le champ dans le diélectrique, d et l les épaisseurs d'air et de diélectrique — σ , la densité réelle due au frottement Σ , Σ' , σ_1 et $-\sigma_1$ et les densités fictives d'influence et de polarisation. De

plus nous assimilerons les armatures de la cage et les faces de la lame isolante à des plans indéfinis et parallèles entre eux. On obtient immédiatement les relations suivantes :

$$(1) \quad E_2 = 2\pi[\Sigma' - \Sigma - \sigma]$$

$$(2) \quad E_1 = 2\pi[\Sigma' - \Sigma + \sigma - 2\sigma_1] = E_2 + 4\pi\sigma - 2\pi\sigma_1.$$

La densité fictive de polarisation est liée au champ E et à la susceptibilité par :

$$(3) \quad \sigma_1 = kE_1$$

(2) et (3) donnent : $E(1 + 4\pi k) = E + 4\pi\sigma$,
ou en désignant par K la constante diélectrique :

$$(4) \quad KE_1 - E_2 = 4\pi\sigma.$$

A l'équation (4) il faut associer une équation exprimant que la différence de potentiel est 0 ou 640 volts, soit :

$$(5) \quad E_1 l + E_2 d = 0$$

ou :

$$(6) \quad E_1 l + E_2 d = 640.$$

En éliminant E_1 entre (4) et (5) ou entre (4) et (6) on trouve pour le champ dans l'air :

$$E_2 = \frac{-4\pi\sigma l}{l + kd}.$$

les deux plateaux sont au sol ; E est dirigé vers le bas :

$$E_2 = \frac{640 - 4\pi\sigma l}{l + kd}.$$

la différence de potentiel est de 640 volts.

Dans ce cas le sens de E dépend de la valeur de : σ .

Opérons en u. e. s. c. g. s. : 640 volts = 6,4/3 = 2,13 u. e. s.
d'autre part pour l'ambre utilisé K a été trouvé (voir p. 66)
égal à 2,19 : $l = 0$ cm. 3 ; $d = 0$ cm. 6 :

$$E_2 = \frac{4,66 - 3,78\sigma}{0,43}.$$

E_2 sera inversé, c'est-à-dire dirigé vers le haut si :

$$\sigma < 4,66/3,78 = 1,23.$$

J'avais systématiquement réalisé cette condition en électrisant peu le diélectrique afin que le champ auxiliaire soit comparable au champ électrostatique dû à l'électrisation de frottement. En réalité au bout de 40 minutes le champ est réduit par suite de la conductibilité du diélectrique : les charges se sont déplacées de façon à annuler le champ à son intérieur. Il en résulte que les champs sont supérieurs à ce que donne le calcul précédent qui ne tient pas compte de la conductibilité du diélectrique et qu'il est possible d'avoir dans l'air un champ dirigé vers le haut même avec des densités initiales supérieures à celle calculée ci-dessus. Si le champ est dirigé vers le haut le courant d'ionisation au lieu de s'opposer au courant dû à l'hystérésis s'ajoute à lui ; les points de la courbe (4) sont en valeur absolue tous supérieurs à ceux de la courbe (2).

Remarque. — Il est curieux de comparer la courbe (4) à la courbe (2). La grande différence entre ces deux courbes tout de suite après l'application du champ est inattendue. Même si l'on admet que la densité vraie soit entièrement compensée par suite de la conductibilité, le champ dans l'air est inférieur au champ disruptif et le courant d'ionisation est égal au courant de saturation ; la variation indiquée par la courbe (4) ne semble pas devoir s'interpréter par une diminution du champ extracteur due à une réorganisation des charges fictives. Il semble plutôt qu'on doive l'attribuer à une variation d'intensité ou de fréquence du rayonnement ionisant. Celui-ci serait donc lié, non à la densité vraie mais aux champs dans l'air et dans le diélectrique.

On est d'ailleurs également conduit à cette conclusion en remarquant que les courants obtenus diminuent rapidement (presque de façon exponentielle), avec le temps alors que les charges portées par le diélectrique ne diminuent en quelques jours que de façon très faible.

Nous indiquerons plus loin (p. 67) des raisons plus importantes d'adopter cette hypothèse,

CHAPITRE III

Etude directe du rayonnement émis par les diélectriques électrisés.

I

DIÉLECTRIQUES ÉLECTRISÉS PAR FROTTEMENT

1. — Les expériences précédentes sont complexes car il y a simultanément ionisation et influence. Il est naturel d'essayer de séparer les deux phénomènes afin d'éviter une correction pénible ; celle-ci a une importance telle qu'elle interdit toute étude quantitative du rayonnement ; pour supprimer l'influence il faut placer le diélectrique hors de la chambre d'ionisation. L'idéal serait alors de fermer celle-ci par une fenêtre conductrice. Malheureusement les feuilles usuelles d'étain et d'aluminium (épaisseur $20\ \mu$) arrêtent le rayonnement. Les feuilles organiques telles que la cellophane et le collodion sont trop isolantes pour jouer le rôle d'écran. Si on les rend conductrices en les imprégnant d'acides ou d'un sel métallique on augmente leur coefficient d'absorption de façon inconnue ; ainsi, même si elles étaient transparentes, leur emploi ne fournirait aucun renseignement. Toutes ces circonstances obligent à se servir de grilles pour arrêter l'influence. Mais une grille, au sens absolu, ne constitue pas un écran parfait. Cette propriété est rappelée dans tous les ouvrages classiques où l'on donne d'après Maxwell la forme des surfaces équipotentiellles après traversée de la grille. Or, en se reportant au traité de Maxwell, on

électrostatique. Les réglages faits, on peut manipuler de l'extérieur même lorsque le quadrant de l'électromètre est isolé. Il présente par contre un inconvénient presque prohibitif, si l'on est obligé d'opérer avec une distance des plateaux de l'ordre du millimètre. En effet les grilles très fines qu'il faut utiliser sont toujours mal tendues. Elles se déforment *de façon variable* sous le poids des diélectriques. L'appareil n'est *pas fidèle*. Il faut donc utiliser un appareil dans lequel le diélectrique soit placé *sous la grille*. J'ai fait construire l'appareil décrit dans la première partie de cet exposé (p. 11). Cet appareil m'a donné toute satisfaction par sa fidélité et sa facilité de manœuvre. Il présente cependant sur un point un défaut (d'ailleurs plus apparent que réel) : aucun réglage n'est prévu pour modifier d'une façon continue la distance grille-diélectrique. Cela n'a pas grande importance. En effet le plan de la grille est mal défini : par construction même des grilles qui comportent des fils de $1/10$ de mm. de diamètre superposés l'un à l'autre, l'épaisseur des grilles est de $2/10$ de mm. ; enfin parce qu'il est impossible de tendre parfaitement des grilles aussi fines que celles utilisées. Il en résulte que la distance diélectrique-grille comporte une imprécision de $1/2$ mm. environ : un réglage continu est alors inutile et je me suis contenté de soulever les lames avec des cales métalliques très rigides ; un jeu de cales permet d'obtenir toutes les distances désirées et la perfection avec laquelle l'industrie livre ces lames suffit largement pour les mesures effectuées. Il faut alors conduire les expériences de façon à ne pas faire intervenir la distance grille-diélectrique mais uniquement ses variations.

3. Méthodes de mesures. — On ne peut déplacer un diélectrique chargé vis-à-vis de conducteurs au sol sans faire intervenir des effets d'influence et créer des perturbations dans le régime de décharge de ce diélectrique par suite de son hystérésis. Il est donc difficile de faire des mesures croi-

sées. Il faut faire des mesures successivement à différentes distances de la grille. Ces mesures n'ont un sens que parce que l'électrisation limite d'une lame est une quantité définie à condition de prendre quelques précautions. Il ne faut électriser que des lames primitivement déchargées. On les passe plusieurs fois au-dessus d'une flamme et les laisse au repos de façon à faire disparaître tout résidu.

Lorsqu'on essaie de faire des mesures à diverses distances de la grille on s'aperçoit qu'on est limité à un domaine très étroit et que ce domaine n'est pas déterminé par la faible pénétration du rayonnement étudié. Inférieurement on est limité par l'influence : trop près, la grille n'est pas un écran suffisant. Cette distance minima dépend du diélectrique utilisé. En particulier les corps qui s'électrisent positivement se déchargent plus vite que les autres ; ils exigent donc une distance plus grande à la grille. On est limité supérieurement par l'irrégularité des courants obtenus. Voici un exemple dans le cas de l'ambre :

Pour une distance grille ambre voisine de 4 mm. les courants varient de la façon suivante :

Temps . .	1/2	3/4	1	1,5	2	3	
Intensité . .	34	32	20	18	16	15,5	
Temps . .	4	5	6	7	8	10	15
Intensité . .	15,5	11,5	11	10,5	9,5	7	3

les temps sont exprimés en minutes ; les intensités en unités arbitraires. Dans cette mesure le courant diminue avec le temps d'une façon à peu près régulière. Si, par contre, on augmente la distance de l'ambre à la grille jusqu'à la porter à environ 7 mm. on obtient les résultats suivants :

Temps. . .	1/2	3/4	1	1,5	2	3	
Intensité . .	34	34	18	8	6	4,5	
Temps. . .		4	5	6	7	8	15
Intensité . .		3,5	4,5	24	39	2	1

On remarque une brusque augmentation de courant aux 6^e et 7^e minutes. Les courbes tracées montrent d'ailleurs de façon frappante la différence des deux mesures (fig. 15).

Voici l'explication proposée pour ce phénomène :

Les lames ont des dimensions finies et on ne peut les assimiler à plans indéfinis parallèles à la grille que si la

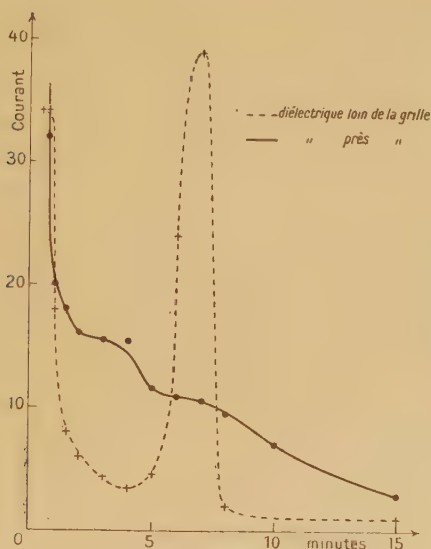


Fig. 15.

..... diélectrique loin de la grille.
 — diélectrique près de la grille.

distance qui les sépare de celle-ci est faible. Autrement dit même dans le cas d'électrisation uniforme, le champ ne sera pas normal à la surface de la lame dans une région voisine des bords et dont les dimensions sont de l'ordre de la distance grille-diélectrique. Dans cette région les lignes de force seront inclinées sur la surface et les charges tendront à se déplacer sur la lame. Or ces déplacements superficiels au voisinage des bords sont accompagnés d'effluves. On peut

s'en convaincre en examinant dans l'obscurité les lames chargées ou plus aisément en saupoudrant la lame du mélange classique soufre-minium, on voit alors (fig. 16) des arborescences partant toutes du bord et se ramifiant vers le centre de la lame. Ces ramifications pénètrent d'autant plus vers le milieu que l'on a laissé le diélectrique se décharger plus loin d'un plan métallique. C'est au moment où se produit un effluve que la courbe de décharge comporte une brusque augmentation. Je me suis toujours efforcé d'éviter la pro-



Fig. 16.

duction d'effluves et n'ai tenu compte que des décharges régulières pour calculer les coefficients d'absorption.

Voici le mode opératoire que j'ai adopté :

Augmentons de d la distance grille-diélectrique, l'intensité du rayonnement à son entrée dans la chambre d'ionisation est réduite dans le rapport $e^{-\mu d}$ si l'on désigne par μ le coefficient d'absorption de l'air pour le rayonnement considéré. Le rapport des courants d'ionisation dans les deux cas donne ce rapport de réduction. On trouvera dans Hollweck ⁽¹⁾ l'exposé détaillé de méthodes analogues. Remarquons toutefois que l'emploi des grilles supprime ici toute correction d'inclinaison car, avec les grilles fines utilisées, seuls les rayons normaux pénètrent dans la chambre.

Pour que la méthode soit correcte, il ne faut mesurer que le courant dû aux ions formés dans la chambre à l'exclusion de ceux formés entre le diélectrique et la grille. Ceci impose de prendre un champ extracteur de sens opposé à celui du champ dans l'intervalle diélectrique-grille et d'intensité suffisante pour arrêter les ions, qui, par leur vitesse acquise, auraient franchi les mailles de la grille. C'est autant pour

⁽¹⁾ HOLLWECK. *De la lumière aux rayons X*, 59.

cette raison que pour augmenter par chocs le nombre d'ions produits que j'ai utilisé des champs intenses de l'ordre de 6 000 volts/cm.

4. Résultats obtenus. — La sensibilité de la méthode employée pour mesurer les courants m'a permis de suivre l'intensité du courant pendant 15 minutes de minute en minute. J'ai ainsi pu mettre en évidence, dans le cas de corps chargés négativement, la croissance avec le temps des coefficients d'absorption. A mesure que les diélectriques se déchargent leur rayonnement est plus absorbable. Une mesure faite avec l'ambre a donné les résultats suivants :

Temps (minutes) .	1,5	2	3	8	10	15
μ (cm. ⁻¹) . . .	2,2	2,7	3,3	4,2	5,2	5,9

Les corps chargés positivement donnent des courants plus faibles que les corps chargés négativement et les mesures ne peuvent donner que des moyennes.

Voici les résultats trouvés :

Ambre	2 à 6 cm. ⁻¹	} Corps se chargeant négativement par frottement.
Soufre	3 à 10 »	
Ebonite	8 à 10 »	
Paraffine	13 à 17 »	
Rhodoïd (acétate de cellulose)	2,4 cm. ⁻¹	} Corps se chargeant positivement par frottement.
Mica (a)	1,8 »	

(a) En réalité la paraffine et le mica ne se chargent pas suffisamment par frottement ; la paraffine parce que trop molle et le mica parce que trop mince. Ils ont été chargés au moyen de l'aigrette.

5. Passage aux longueurs d'onde. — On peut passer des coefficients d'absorption dans l'air aux longueurs d'onde

correspondantes. J'ai utilisé la courbe citée par Dechêne (¹). Cette courbe indiquerait que le rayonnement serait situé au voisinage de 20 Å à supposer que l'on soit du côté des courtes longueurs d'onde. Dans le proche ultra-violet les données numériques manquent, mais il est certain qu'il y a de nombreuses bandes d'absorption de sorte que si l'on se trouvait de ce côté la courbe, supposée connue, donnerait plusieurs solutions. De toute façon il faut compléter ces déterminations en étudiant l'absorption par divers écrans.

6. Absorption par les écrans organiques. — *a)* Les écrans organiques ne constituent pas des écrans électrostatiques ; bien plus ils s'électrisent eux aussi et la charge acquise par influence donne des perturbations énormes. Il faut donc placer ces écrans en champ nul, c'est-à-dire entre deux grilles.

Cellophane. — Lorsque l'on utilise la cellophane sous forme de feuilles commerciales, il est facile d'avoir un dispositif très ramassé. Il suffit de tracer à l'encre de Chine, à l'aide d'un tireligne, un quadrillage serré et régulier. Celui ci jouera le rôle de grille et protégera la cellophane contre l'influence. Le quadrillage est fait d'un seul côté et la cellophane se place à l'intérieur de la chambre d'ionisation protégée de l'influence du diélectrique par la grille fine ayant servi dans le cas de l'air et de l'action du champ dans la chambre par le quadrillage de carbone. On tient compte de la réduction produite par ce quadrillage.

La cellophane utilisée a une densité de 1,5 et une épaisseur de 27 μ elle réduit 10 fois l'intensité du courant d'ionisation ; le grillage réduisant de moitié reste 5 fois, ce qui donne : $\frac{\mu}{\rho} = 181$ et $\log \frac{\mu}{\rho} = 2,59$.

Si l'on admet que la courbe donnée par Hollveck pour le

(¹) DECHÊNE. *Journal de Physique* [7], 7 (1936), 543.

celluloïd est valable, cette mesure donne pour le rayonnement une longueur d'onde de 25 à 30 Å.

Cette mesure ne peut donner qu'un renseignement qualitatif à cause de l'assimilation faite avec le celluloïd et aussi par suite de la trop grande absorption de feuilles aussi épaisses.

Pour aller plus loin j'ai préparé des feuilles de celluloïd d'épaisseurs inférieures à 27 μ , mais suffisamment épaisses pour réduire l'intensité du rayonnement de moitié environ. L'expérience faite avec la cellophane indique qu'il faut des pellicules de 10 μ environ.

b) *Préparation de pellicules de celluloïd.* — Deux techniques sont généralement utilisées : celle d'Hollweck qui consiste à faire évaporer sur le mercure une solution de celluloïd dans l'éther; celle de Miss Laird ⁽¹⁾ également utilisée par Dechêne ⁽²⁾ qui consiste à faire évaporer sur l'eau une solution de celluloïd dans l'acétate d'amyle. La première exige une préparation compliquée : l'éther devant être *complètement* déshydraté; enfin la pellicule est difficile à enlever du mercure pour la placer sur une grille. La deuxième est au contraire très commode tant que l'on désire des épaisseurs donnant les couleurs de lames minces ou même des épaisseurs inférieures. Mais si l'on désire des épaisseurs de plusieurs μ on est conduit soit à utiliser des solutions trop concentrées, soit à employer trop de solution. Dans le premier cas l'étalement sur l'eau se fait mal, dans le deuxième cas l'évaporation est extrêmement lente et irrégulière.

J'ai procédé de la façon suivante : le celluloïd est dissous dans un mélange alcool-éther. Je verse ensuite la solution sur une lame de verre où elle s'évapore laissant une pellicule adhérent fortement au verre. Il s'agit de la faire passer sur la grille. Pour cela la grille est placée au fond d'un récipient

⁽¹⁾ MISS LAIRD, *Physical Review*, **30** (1938), 293.

⁽²⁾ DECHÊNE. *Loc. cit.*, 543.

tel qu'une cuvette photographique soutenue par des cales de quelques millimètres puis recouverte d'eau. Ensuite on incise au rasoir la pellicule de celluloïd sur tout le tour de la plaque et on place la plaque de verre — pellicule en dessous — sur des supports métalliques qui la font juste affleurer la surface de l'eau. Sous l'influence de l'humidité la pellicule se détache du verre et vient flotter à la surface de l'eau. On enlève la plaque de verre, incline la cuvette, et siphonne lentement l'eau de la cuvette. La pellicule vient reposer sur la grille. Grâce à l'inclinaison donnée à la cuvette l'eau se retire graduellement de la pellicule de sorte que celle-ci ne supporte jamais de surpression. La pellicule est maintenant toute ridée; on la fixe sur la grille par ses quatre coins à l'aide d'une goutte de collodion (ou de n'importe quelle solution de celluloïd). Le séchage tend ensuite parfaitement la pellicule; c'est le seul point délicat de l'opération. Il ne faut pas sécher trop vite et si la grille n'a pas une rigidité suffisante il faut la maintenir plane pendant tout le séchage pour éviter que la tension de la pellicule ne la déforme.

c) *Coefficients d'absorption par le celluloïd*. — Ces coefficients ont été déterminés en mesurant successivement l'intensité des courants de décharge : sans pellicule, puis avec pellicule. Comme les précédentes cette mesure n'a de sens que parce que l'on a montré expérimentalement que l'électrisation limite d'un diélectrique est une quantité bien définie et facile à reproduire. Dans le tableau ci-dessous sont donnés les résultats obtenus avec l'ambre, le soufre, et l'ébonite; je rappelle également les valeurs obtenues pour l'air.

Corps	μ (celluloïd en cm.-1)	μ (air en cm.-1)
Ambre.	230	2 à 6
Soufre.	490	3 à 10
Ebonite	740	8 à 10

Aucun résultat ne peut être obtenu avec la paraffine et le rhodoïd. Cet échec était à prévoir : en effet le rhodoïd s'électrifiant positivement, donne comme tous les corps positifs des courants très faibles qui ont rendu déjà pénibles les mesures avec l'air; quant à la paraffine, il faut l'attribuer à la grandeur de son coefficient d'absorption. En effet le tableau précédent montre que les coefficients d'absorption par le celloïd se place comme les coefficients d'absorption par l'air relatifs aux mêmes corps. La paraffine a un coefficient d'absorption par l'air égal à 14 cm.^{-1} soit six fois plus grand que celui de l'ambre. Il faut donc s'attendre à un coefficient d'absorption par le celloïd voisin de 1300 cm.^{-1} , le courant doit donc être vingt-deux fois plus petit que celui relatif aux mesures dans l'air. Il faudrait alors opérer avec des pellicules beaucoup plus minces; celles-ci sont difficiles à obtenir exemptes de trous sur une surface de l'ordre de 150 cm^2 .

7. **Passage aux longueurs d'onde.** — Les résultats fournis par l'étude précédente amènent une remarque importante.

La cellophane (qui est une alcali-cellulose) le celloïd et le collodion (qui sont des celluloses nitrées) donnent le même coefficient d'absorption. Il en résulte que l'absorption est indépendante de la molécule mais ne dépend que des atomes qui la constituent. Cette remarque amène à elle seule à situer le rayonnement du côté des rayons X de grande longueur d'onde.

Hollweck ⁽¹⁾ a tracé la courbe reliant aux longueurs d'onde aux coefficients d'absorption massique par le celloïd. En extrapolant cette courbe du côté des courtes longueurs d'onde les résultats précédents donnent des longueurs d'onde voisines de 20 Å . Ces valeurs concordent avec celles obtenues par les mesures dans l'air et suppriment toute ambiguïté quant au domaine du rayonnement.

(¹) HOLLWECK. *Loc. cit.*, 68.^a

8. Critique des mesures faites avec grilles. — J'ai insisté longuement au début de ce chapitre sur ce que les grilles employées constituaient un écran pratiquement parfait. Il en résulte que les perturbations observées ne peuvent être dues à des phénomènes d'influence produits par les diélectriques.

Cherchons quelles causes peuvent produire une variation de potentiel. Le potentiel de ce système dépend : a) de la charge vraie du système; b) de la position et du potentiel de chacun des corps qui l'environnent.

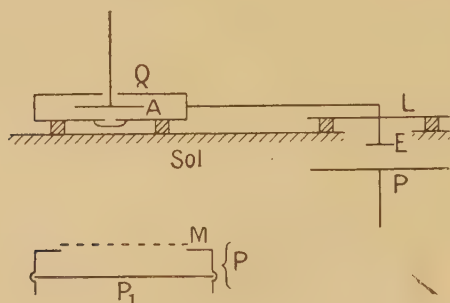


Fig. 17.

a) *Charge vraie du système.* — Le système est constitué comme schématisé ci-contre (fig. 17) : une paire de quadrants Q et une électrode collectrice E soutenue par une lame métallique L. Les pièces métalliques Q et L reposent sur des isolants fixés sur des métaux au sol. Ces isolants sont d'autre part soustraits à tout champ électrique. Ils ne peuvent donc apporter aucune charge sur le système : par l'intermédiaire des isolants la charge du système ne peut que diminuer. Il en résulte que la charge vraie du système ne peut croître que par l'air, soit dans la cage d'ionisation PE proprement dite soit dans la cage de l'électromètre entre l'aiguille A et les quadrants.

Dans les conditions expérimentales où je me suis placé

aucune variation de potentiel n'apparaît en l'absence de diélectrique électrisé ; c'est donc que le courant normal d'ionisation dite spontanée est négligeable.

b) *Charges dues à l'influence des corps voisins.* — Il y aura une variation de charge du système dans l'un des trois cas suivants :

α) Le potentiel de l'un des corps varie.

β) La position relative de ces corps et du système est modifiée.

γ) La constante diélectrique de l'air varie.

α) Les potentiels de l'aiguille A et de l'électrode P sont fixés à l'aide d'accumulateurs : ceux-ci peuvent certes varier, mais là encore le résultat négatif en l'absence de diélectrique montre que ces variations apportent une modification non décelable avec l'appareil utilisé.

β) Pour la même raison que ci-dessus nous n'avons à considérer que les variations de position de P et E. L'électrode P pouvant se déplacer parallèlement à elle-même grâce à une vis micrométrique, il est facile de déterminer expérimentalement l'effet d'une variation de position de P et E. Voici le résultat pour la distance $PE = 2$ mm. adoptée dans les mesures et pour une tension de 320 volts : $1/10$ de mm. produit un déplacement de spot de 364 mm. ; par suite le même déplacement pour la tension de 640 volts adoptée produirait un déplacement de 728 mm.

Comparons aux résultats expérimentaux : le soufre placé sous la grille donne pendant les 10 premières minutes un déplacement du spot de 394 mm., il correspondrait à un déplacement de P de un peu plus de $1/20$ de mm. Or P est constitué (fig. 17) par un couvercle porte-grille M coulissant sur une plaque P, de laiton. La hauteur de M est environ 20 mm. Pour augmenter de $1/20$ de mm. une longueur de 20 mm., soit une variation relative de $1/400$, il faut une variation de température de plus de 100° (100° augmentent de $1/583$ la longueur d'une pièce de laiton).

γ) Variation de la constante diélectrique de l'air. — Avec l'appareil utilisé une variation de distance $2/10$ de mm. sur une distance de 2 mm. produit une variation de capacité de $1/10$, il faudrait donc pour produire la même variation un changement de constante diélectrique de l'air de $1/10$. Or la constante de l'air K est liée à sa densité d par la relation $\frac{K-1}{d} = C^{\text{te}}$, d'où l'on tire: $\frac{\Delta K}{K-1} = \frac{\Delta d}{d} = -\frac{\Delta T}{T}$; en désignant par T la température absolue et enfin :

$$\frac{\Delta K}{K} = - \left(\frac{K-1}{K} \right) \frac{\Delta T}{T}.$$

Dans les conditions ordinaires on a approximativement :

$$\frac{K-1}{K} = 6.10^{-4}$$

$\frac{\Delta K}{K}$ égalera $1/10$ si $\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{6.10^{-4}} \cdot \frac{1}{10} = 160$; c'est dire que la variation d'indice par variation de température ne peut amener de perturbation sensible.

9. **Expérience directe sur les actions calorifiques.** — Afin de vérifier ces calculs, et de peur d'omettre une perturbation importante, j'ai tenu à refaire avec les lames mêmes qui m'ont servi une expérience de contrôle. J'ai utilisé l'ébonite que j'ai chauffé à 300° , température certainement supérieure à celle obtenue par frottement. Afin d'être bien certain de la température j'ai laissé la lame pendant 6 heures dans une étuve chauffée électriquement et réglée par thermostat. L'étuve était dans la même pièce que la cage d'ionisation et distante d'elle de quelques mètres de telle sorte que l'ébonite ne pouvait se refroidir sensiblement pendant son transport dans la cage.

Voici les résultats de deux mesures succédant chacune à un chauffage de 6 heures. Dans ces mesures l'ébonite est placée respectivement sur les supports métalliques de 2 mm. et 4 mm. ayant servi à la détermination des coefficients

d'absorption dans l'air. Dans ce tableau t représente le temps exprimé en minutes et i les courants moyens exprimés en millimètres d'échelle parcourus pendant une minute.

t	0	1/4	1/2	3/4	1	1,5	2	3	4
i_1	-24	-32	-36	-16	-8	-4	+4	+10	+12
i_2	-44	-4	+4	+8	+6	+3	+5	+7	+8
t	5	6	7	8	9	10	11	12	15
i_1	+13	+11	+10	+8	+8	+7	+4	+5	+2
i_2	+8	+7	+7	+6	+5	+4	+3	+3	+2

J'ai porté ces mesures sur les courbes représentées sur la figure 18 et j'ai mis en regard les mesures obtenues avec la même lame électrisée et placée sur les mêmes supports. On

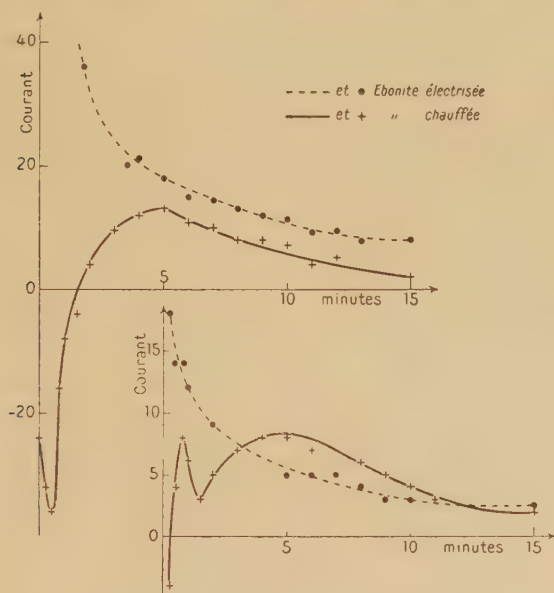


Fig. 18. — En haut l'ébonite est plus près de la grille (5 mm. au lieu de 7 mm.).

voit nettement que les deux phénomènes n'ont aucun rapport : tandis que l'échauffement donne une courbe qui s'annule passe par un maximum puis tend vers zéro, l'électrisation donne une courbe constamment décroissante.

10. Emission de charges par lame. — Le phénomène ne peut non plus s'expliquer par une émission d'ions par la lame, car les ions positifs seraient retenus par le champ que crée la lame à son voisinage et, d'autre part les ions négatifs seraient arrêtés par le champ antagoniste régnant entre la grille et l'électrode collectrice. Si d'ailleurs ils ne l'étaient pas ils donneraient un courant de sens inverse à celui observé.

II

DIÉLECTRIQUES ÉLECTRISÉS PAR D'AUTRES MOYENS QUE LE FROTTEMENT

Pour essayer de préciser le mode de décharge des diélectriques électrisés, il faut chercher si celui-ci dépend seulement de la charge portée par l'isolant ou s'il varie avec la façon dont l'électrisation a été produite.

1. — Si l'on approche une lame neutre d'un des poles d'une machine de Wimshurt la lame se charge. L'expérience faite avec l'ambre et le soufre m'ayant donné pour les coefficients d'absorption par l'air les mêmes valeurs que pour une charge par frottement, j'ai chargé ainsi la paraffine et le mica qui ne prennent par frottement qu'une charge insuffisante pour les mesures. C'est ainsi que j'ai déterminé les valeurs données au chapitre III pour ces deux corps.

2. — Le moyen précédent s'il est commode, est assez mal défini. Pour préciser les conditions expérimentales, j'ai utilisé une source à haute tension constituée par un ensemble de transformateurs et kénotrons et j'ai repéré au voltmètre les tensions utilisées.

a) Si l'on place le diélectrique entre 2 plateaux métal-

liques et que l'on applique une tension d'une dizaine de kilovolts le diélectrique se polarise fortement mais la charge vraie qu'il prend est insignifiante. Apporté dans l'appareil à grilles (chapitre III) il ne donne aucun courant d'ionisation mesurable. Pourtant avec les tensions appliquées, juste inférieures au potentiel disruptif, on voit une petite aigrette qui contourne le diélectrique.

b) J'ai utilisé ensuite une cellule semi-conductrice analogue à celles étudiées par M. Reboul (¹).

α) Le diélectrique est interposé entre une lame métallique au sol et la cellule; il faut que celle-ci ait des dimensions plus faibles que celle de la lame isolante. Lorsque l'appareil fonctionne, on voit un flot d'effluves sortir des pores de la cellule, contourner le diélectrique et rejoindre la lame métallique. Le courant utilisé était de 0,2 mA et la tension de 30 Kv., la durée d'exposition de 30 secondes à 1 minute. Dans ces conditions le diélectrique ne s'est pas sensiblement échauffé il est par contre fortement chargé. Porté dans l'appareil à grille il donne un fort courant d'ionisation. Les coefficients d'absorption par l'air sont comparables à ceux obtenus dans l'électrisation par frottement. La naphthaline exposée 1 minute donne un coefficient croissant de $\mu = 1,0 \text{ cm.}^{-1}$ pendant la première minute de mesure à $2,1 \text{ cm.}^{-1}$ à la 15^e minute. L'ébonite donne de $1,0$ à $1,9 \text{ cm.}^{-1}$; la paraffine $1,0 \text{ cm.}^{-1}$ également. On remarque que ces coefficients sont un peu plus faibles que ceux obtenus dans l'électrisation par frottement et que les différences entre les différents corps ont à peu près disparu.

β) Si on place le diélectrique hors de la cellule, c'est-à-dire si on place celle-ci sur une grille au sol et la grille sur le diélectrique, le diélectrique se charge mais ne donne après exposition, même prolongée pendant 1/2 heure, aucun courant d'ionisation mesurable. Cela semble indiquer une

(¹) M. G. REBOUL. *Comptes Rendus*, 194 (1932), 1733.

grande différence entre le phénomène étudié ici et l'activation des papiers signalés par M. Reboul.

3. — Enfin j'ai essayé un mode de charge basé sur la photoconductivité des diélectriques sous l'action de la lumière ultra-violette. Le diélectrique soumis à un champ intense était éclairé par la lumière d'une lampe à vapeur de mercure en quartz. La lumière était ensuite supprimée, puis le champ. J'avais espéré que le diélectrique redevenant isolant les charges seraient immobilisées comme elles le sont dans le cas des *électrets*. Le résultat fut constamment négatif, que les corps fussent opaques comme le soufre, l'ambre ou l'ébonite ou au contraire transparents comme le mica ou le rhodoïd.

4. **Conclusions.** — Cette étude confirme les résultats obtenus dans le cas du frottement. Il n'y a émission que si la lame est chargée de façon dissymétrique. La polarisation même intense ne donne rien.

CHAPITRE IV

Théorie de l'émission du rayonnement par les diélectriques électrisés.

I

RELATION ENTRE LA FRÉQUENCE DU RAYONNEMENT ET LA NATURE DU DIÉLECTRIQUE

1. Discontinuités K. — L'expérience a montré que des corps aussi différents au point de vue chimique que le soufre et l'ambre émettaient des rayons de longueurs d'onde voisines. Ces corps n'ont en commun que le fait d'être formés d'éléments légers ; mais les longueurs d'onde du rayonnement qu'ils émettent ne paraissent pas liées aux discontinuités K de ces éléments, ni contenir les raies caractéristiques de ces éléments.

Eléments . . .	Oxygène	Azote	Carbone	Soufre
Série K . . .	23,8	31,8	44,9	5,36

Il faut donc chercher une propriété commune aux corps expérimentés et en même temps essayer d'expliquer les faibles différences de longueurs d'onde observées en passant d'un corps à l'autre.

2. Densité des corps. — J'ai trouvé les résultats suivants.
Corps se chargeant négativement :

	Ambre	Soufre	Ebonite	Paraffine
Densité. . .	$\overline{1,04}$	$\overline{2}$	$\overline{1,55}$	$\overline{0,83}$
Air (cm ⁻¹). .	3	6	9	10

Corps se chargeant positivement :

	Rhodoïd	Mica
Densité	$\overline{1,40}$	$\overline{3,1}$
Air (cm ⁻¹) . . .	2,4	1,9

Ces densités sont voisines de celles données dans le *Recueil des constantes de la Société de Physique* à l'exception de l'ébonite plus dense (1,55 au lieu de 1,15) nous indiquerons plus loin une conséquence de cette différence. J'ai rappelé au-dessous les valeurs des coefficients d'absorption par l'air. On voit qu'il n'y a aucune corrélation entre ces deux propriétés.

3. **Dureté des corps utilisés.** — Je n'ai pas fait des mesures quantitatives de dureté, je rappelle simplement que des corps mous, tels la paraffine, se chargent difficilement par frottement et que je n'ai pu expérimenter avec la paraffine qu'en la chargeant au moyen d'une aigrette. Il en résulte que la comparaison porte surtout sur les trois premiers corps : ambre, soufre, et ébonite, corps de dureté comparables et tous trois chargés par frottement.

4. **Constantes diélectriques.** — Les Tables donnant les valeurs suivantes : ambre 2,7, soufre 4, ébonite 2,94. Il semble ici non plus n'y avoir aucune corrélation. Toutefois le désaccord trouvé dans le cas de la densité de l'ébonite m'a conduit à reprendre ces déterminations.

J'ai fait ces mesures des constantes diélectriques par une méthode statique. Les lames utilisées n'étant pas rigoureusement à faces parallèles il était impossible d'obtenir une mesure des constantes diélectriques à plus de quelques pour cent près,

par suite de l'incertitude sur l'épaisseur (1/10 de mm. sur 4 mm. environ soit de 2 à 3 o/o). Je me suis tout de même efforcé d'atteindre toute la précision désirable en mesurant les autres grandeurs du mieux possible. L'appareil qui m'a servi était la chambre d'ionisation elle-même. J'ai signalé en effet qu'un plateau était monté avec anneau de garde et que trois vis calantes permettaient d'amener le plateau supérieur à être parallèle au plateau inférieur.

Le plateau inférieur (fig. 2) peut se déplacer parallèlement à lui-même et le déplacement lu sur le tambour inférieur est connu à quelques 1/100 de mm. près.

Voici un exemple de détermination (ambre). La lame est placée sur le plateau inférieur au sol; le plateau supérieur est réuni à l'un des quadrants qu'on isole. On fait ensuite passer le potentiel du plateau inférieur de 0 + 4 volts : le spot dévie de 215 divisions. On vérifie qu'il revient à zéro si l'on remet au sol le plateau inférieur; il n'y a donc pas eu de fuite ni de perturbation et la lame n'est pas électrisée. Il est à remarquer de plus que l'ambre ne touche pas le plateau supérieur donc que la conductibilité de l'ambre n'intervient pas.

L'ambre étant sorti, on cherche de combien il faut soulever le plateau inférieur pour obtenir la même déviation 215; voici les nombres trouvés.

Soulèvement.	2 mm.	2,20 mm.	2,30 mm.	2,35 mm.	2,40 mm.
Déviation	204	210	212,5	214,2	215,3

Par interpolation on voit qu'il faut diminuer de 2 mm. 37 la distance des plateaux; si e est l'épaisseur de l'ambre, il est équivalent à une épaisseur d'air de $e - 2,37$; la constante diélectrique de l'ambre est donc :

$$K = \frac{e}{e - 2,37} = \frac{1}{1 - \frac{2,37}{e}}.$$

Reste à déterminer l'épaisseur : afin d'obtenir le plus de précision possible je l'ai déterminée avec l'appareil lui-même.

En effet la vis de l'appareil fabriquée au tour est certainement excellente; mais son pas n'est probablement pas exactement 1 mm. (ne serait ce que par suite de la température au moment de la mesure). Mais si l'on mesure l'épaisseur avec l'appareil lui-même, comme dans l'expression de K ne figure que le rapport de deux épaisseurs, l'erreur d'étalement est compensée. On trouve 4 mm. 36 pour l'épaisseur de l'ambre sa constante diélectrique est donc $K = 2,19$.

Au total les résultats trouvés ont été les suivants.

Ambre	Soufre	Ebonite
$\overline{2,19}$	$\overline{3,20}$	$\overline{3,50}$

la place de l'ébonite s'explique si on remarque que les *Recueils de Constantes* donnent : densités, 1,15; constante K , 2,8 et que je trouve : densités, 1,55; constante K , 3,50.

Ces deux couples de nombres vérifient bien la loi :

$$\frac{K-1}{d} = \text{Constante}; \text{ dans ce cas la constante est de } 0,58.$$

5. Relation entre la fréquence des radiations émises et la constante diélectrique. — Ces résultats montrent que les valeurs des constantes diélectriques et des coefficients d'absorption

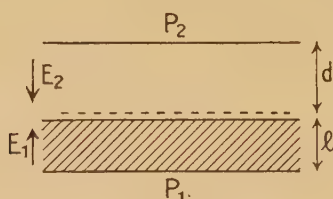


Fig. 19.

varient dans le même sens. On peut essayer de préciser la relation qui lie la fréquence du rayonnement émis à la constante diélectrique du corps émetteur.

Considérons (fig. 19) une lame diélectrique d'épaisseur l , de constante diélectrique K , surmontée par une couche

d'air d'épaisseur d le tout étant entre deux plateaux métalliques au même potentiel. Si la lame est chargée uniformément avec une couche de densité σ il est facile de calculer le champ E_1 à son intérieur : il est égal à $E_1 = \frac{4\pi d}{1+K}$.

A densité égale, il est d'autant plus grand que K est plus faible. Nous supposons que la fréquence du rayonnement émis est proportionnelle à l'intensité du champ E_1 dans la lame. Nous allons montrer que cette hypothèse explique quantitativement les résultats obtenus.

Pour déterminer les coefficients d'absorption par le celluloid nous avons placé les lames dans la disposition ci-dessus (fig. 19) (le plan P étant en réalité une grille à très fine maille) et dans le cas de l'expérience on avait très approximativement $d=l=4$ mm. 5 ; donc si nous supposons les lames également chargées le champ à leur intérieur était proportionnel à $\frac{4\pi}{1+K} = \frac{12,5}{1+K}$.

D'autre part les coefficients trouvés ont situé le rayonnement dans le domaine des rayons X de grande longueur d'onde (20 Å environ) et dans cette région la loi de Bragg et Pierce s'applique c'est-à-dire que les coefficients μ sont proportionnels à ν^{-3} .

Puisque nous admettons que les fréquences ν sont proportionnelles aux champs on doit avoir $\frac{12,5}{1+K} \sqrt[3]{\mu} = \text{Constante}$.

Voici les résultats obtenus :

	K	$\frac{12,5}{1+K}$	μ	$\sqrt[3]{\mu}$	Produits
Ambre .	2,19	3,92	230	6,12	23,0
Soufre .	3,10	3,02	490	7,88	23,8
Ebonite .	3,50	2,78	740	9,05	25,1

Les produits sont donc égaux à 4 o/o près à la valeur moyenne 24. Si l'on admet l'explication proposée la pénétration du rayonnement sera d'autant plus grande que la constante diélectrique sera plus faible.

6. — J'ai pensé que l'on pourrait trouver des corps très différents des isolants usuels utilisés jusqu'ici, et capables cependant d'émettre par suite de leur faible constante diélectrique. L'examen des *Recueils de Constantes* m'a suggéré l'essai de la naphthaline, j'ai mesuré successivement sa constante diélectrique ($K = 2,5$) puis son coefficient d'absorption dans l'air ($\mu = 2,6 \text{ cm}^{-1}$).

7. — Enfin j'ai cherché dans la liste des verres ceux à faible indice qui, par suite, devaient avoir une faible constante diélectrique. Les tables donnent pour l'anhydride borique $n_D = 1,4636$ et j'ai utilisé ce corps. Je l'ai préparé par déshydratation de l'acide commercial. L'anhydride obtenu fond à 577° mais à cette température est très visqueux de sorte que l'air interposé s'élimine avec peine. Les fours dont je disposais (four à moufle au gaz et four électrique à résistance métallique) ne me permettaient pas de dépasser suffisamment le point de fusion pour obtenir une lame homogène.

Je n'ai donc pas pu mesurer avec une précision suffisante la constante diélectrique de l'anhydride. Mais la lame que j'avais préparée s'électrisait très bien (négativement) et il a été possible de mesurer son coefficient d'absorption par l'air : il varie de 1 à $2,5 \text{ cm}^{-1}$, c'est-à-dire est faible, comme prévu et même inférieur à ceux des corps précédemment utilisés.

II

THÉORIE QUANTIQUE DE L'ÉMISSION DU RAYONNEMENT

1. — La relation trouvée entre la fréquence du rayonnement émis et l'intensité du champ dans le corps émetteur montre que l'explication du rayonnement émis doit être cherchée dans la théorie des quanta.

L'expérience a montré que la fréquence du rayonnement émis diminuait de *façon continue* à mesure que le corps se déchargeait. Toute théorie va donc se heurter aux **mêmes** difficultés que les théories du fond continu dans le cas des rayons X ordinaires : il ne sera pas possible de pousser le raisonnement jusqu'à l'échelle atomique et l'on devra se borner à vérifier la relation d'Einstein : $eV = h\nu$.

La chute maximum de potentiel que peut subir l'électron est obtenue quand il passe (fig. 19) de la face électrisée à l'un des plans P_1 ou P_2 (corps électrisés négativement) ou au contraire (corps électrisés positivement) des plans P_1 ou P_2 à la face électrisée. En utilisant les mêmes notations que ci-dessus (voir fig. 19) cette valeur maximum est égale à :

$$V = \frac{4\pi\sigma ld}{l + Kd}.$$

Dans les expériences faites on avait approximativement :

$$l = d = 0 \text{ cm. } 5 ; K = 3, \quad \text{c'est-à-dire : } V = 1,5 \sigma \text{ u. e. s.}$$

Les densités maxima que l'on peut obtenir par frottement sont de quelques unités : si nous prenons :

$$\sigma = 4 \text{ il vient } V = 6 \text{ u. e. s.}$$

D'autre part à une longueur d'onde de $20 \text{ \AA}$ correspond un quantum de 625 électron-volts. Il suffit donc, pour faire acquérir à l'électron le quantum nécessaire, d'une différence de potentiel de 2 u. e. s., c'est-à-dire du tiers de la différence de potentiel disponible.

Au point de vue énergétique l'explication paraît possible mais il reste à préciser le lieu de l'émission et à chercher un mécanisme qui ne soit pas contradictoire avec les données sur l'électron ou sur le rayonnement émis.

Il nous faut distinguer entre les corps chargés positivement et les corps chargés négativement.

2. Corps chargés positivement. — Les électrons viennent vers la face chargée.

Nous admettrons que cette face constitue le lieu d'émission. Il y a en effet sur elle inversion des champs, tout électron lancé éprouvera un arrêt sur elle.

Avec les valeurs admises au paragraphe précédent on voit qu'il faut admettre pour l'émission un parcours, normal à la face chargée, de l'ordre du millimètre sans perte d'énergie. Un tel parcours est beaucoup plus grand que les libres parcours moyens admis dans l'air ; au contraire on a été obligé d'admettre de tels parcours dans les cristaux photoconductifs. Nous adopterons cette hypothèse, supposant dans les diélectriques soit un trajet sans choc de l'ordre du millimètre, soit des chocs élastiques.

En résumé le mécanisme proposé est le suivant :

Un électron part de l'intérieur du diélectrique (au moins d'une profondeur de 1 mm.) ; il est lancé par le champ dû à l'électrisation positive de la lame. Arrêté brutalement sur la face chargée il perd son énergie, libérant le photon équivalent.

3. Corps chargés négativement. — L'explication paraît ici beaucoup plus délicate car les champs créés par l'électrisation éloignent l'électron de la face chargée soit dans l'air, soit dans le diélectrique. Si l'électron part dans l'air la petitesse des libres parcours l'empêchent d'acquérir le quantum nécessaire. D'ailleurs si l'on faisait intervenir les constituants de l'air on aurait plutôt des spectres optiques que des spectres de rayons X.

Il faut donc supposer un départ dans le diélectrique et, comme pour les corps chargés positivement, un parcours sans perte d'énergie de l'ordre du millimètre. Mais une émission à une telle profondeur est inadmissible, étant donnée la grandeur des coefficients d'absorption. Même pour les éléments légers (comme ceux qui interviennent dans la constitution des diélectriques utilisés) l'expérience (2^e partie du chapitre II) donne pour μ plusieurs centaines de cm^{-1} . Il

en résulte que l'émission doit avoir lieu à une profondeur inférieure à un centième de centimètre. Le mécanisme proposé doit donc concilier les deux conditions suivantes : émission à une profondeur inférieure à $1/10$ de mm. ; parcours suivant le champ de l'ordre du millimètre. Ces deux conditions ne peuvent être satisfaites simultanément que si les lignes de force du champ sont très inclinées sur la face électrisée.

Nous avons obtenu ci-dessus des lignes de force normales comme conséquence de l'uniformité de l'électrisation. Il est facile de trouver des raisons à une électrisation irrégulière, irrégularités de la lame, mode d'électrisation, ..., mais ces raisons qui font intervenir les caractéristiques d'une certaine lame, d'une certaine électrisation ne sont pas à retenir : elles devraient produire des résultats variables d'une expérience à l'autre, d'un échantillon à l'autre. Or l'expérience donne, dans ces divers cas, des résultats comparables et en particulier les mêmes valeurs pour les coefficients d'absorption, donc pour les fréquences. Les lignes de force étaient normales parce qu'on avait assimilé les faces de la lame et les plans P_1 et P_2 (fig. 19) à des plans parallèles indéfinis. En réalité dans les expériences le diélectrique est placé sous la grille de la figure 6, c'est-à-dire dans une boîte dont la longueur n'excède celle de la lame que de 2 à 3 cm. et même pour faciliter la manipulation des isolants et leur éviter le contact des doigts, on les plaçait généralement dans une boîte de laiton ne laissant libre que la face électrisée.

Dans ces conditions la surface équipotentielle de potentiel pris comme origine est constituée par la grande face non électrisée et les faces latérales. Il est donc certain que les surfaces équipotentielles sont, *au voisinage des bords*, très différentes de plans. D'ailleurs la face chargée n'est pas non plus une surface équipotentielle, et les lignes de forces seront très inclinées sur les bords.

Il nous faut évidemment retoucher le calcul fait dans

l'hypothèse de plans indéfinis ; nous allons voir que les résultats numériques ne sont pas modifiés.

Faisons le calcul pour le champ suivant l'axe de symétrie de la lame. Gardant les notations de la figure 19, nous désignerons par : — σ la densité vraie ; + σ' la densité fictive de polarisation au centre de la face chargée, l et d les épaisseurs (de diélectrique et d'air. Nous admettrons de plus que les champs E_1 dans le diélectrique et E_2 dans l'air sont constants tout le long de l'axe de symétrie

Nous pouvons écrire que les plans P_1 et P_2 sont au même potentiel, c'est-à-dire :

$$E_1 l + E_2 d = 0 \quad (1)$$

Considérons un tube de force, centré sur l'axe de symétrie, et partant de part et d'autre de la surface de séparation diélectrique air et de hauteur infiniment petite. Dans l'hypothèse d'un champ uniforme suivant l'axe ce tube est assimilable à un cylindre droit ; soit dS sa base. Ecrivons que le flux sortant de ce tube est égal à 4π fois la somme des charges qu'il contient :

$$(E_1 - E_2)dS = 4\pi(\sigma - \sigma')dS.$$

En se rappelant que $\sigma' = kE_1$, et en appelant K la constante diélectrique de l'isolant, la relation précédente s'écrit :

$$KE_1 - E_2 = 4\pi\sigma \quad (2)$$

Les relations (1) et (2) donnent :

$$E_1 = \frac{4\pi\sigma d}{l + Kd} \quad E_2 = - \frac{4\pi\sigma l}{l + Kd}$$

$$V = E_1 l = - E_2 d \frac{4\pi\sigma d}{l + Kd}.$$

Ce sont les mêmes expressions que dans le cas de l'électrisation uniforme ; mais ici elles ne sont valables que suivant l'axe de symétrie.

La substitution au système de plans parallèles du système réel n'a pas changé la chute maximum de potentiel, seule la forme des surfaces équipotentiellles est modifiée. Le fait

important est que l'électron pourra acquérir le quantum nécessaire en se déplaçant très obliquement ou même dans le plan de la lame. Le rayonnement *sortant de la lame* prendra naissance au voisinage de la face chargée et principalement sur les bords. Quant au rayonnement prenant naissance à l'intérieur de la lame il sera absorbé par celle-ci.

4. Conséquence de cette théorie. — a) On voit la différence essentielle entre corps chargés positivement et négativement. Dans le premier cas toute la face chargée émet; c'est seulement le voisinage des bords dans le deuxième cas. Puisque le rayonnement émis ionise l'air environnant et active la décharge, il est à prévoir que les corps chargés positivement, à densité égale, se déchargeront plus vite que les corps chargés négativement : c'est ce que vérifie l'expérience courante.

b) L'expression de V montre que V croît avec d , c'est-à-dire avec l'épaisseur d'air qui surmonte le diélectrique. Si cette épaisseur est très faible, V le sera aussi et il ne pourra y avoir émission de rayonnement ionisant : on sera dans les conditions optima pour conserver l'isolant chargé. J'ai rappelé au début de ce travail que l'on conservait leur charge aux isolants en les enveloppant de papier métallique.

c) Lorsqu'on utilise des isolants pour des expériences d'électrostatique on peut leur demander soit de créer à leur voisinage un champ intense, soit de conserver le moins possible une électrisation accidentelle (supports de quadrants d'électromètres par exemple). L'expression de E_2 dans le premier cas, de V dans le deuxième montre que l'on a intérêt à utiliser des isolants épais. Dans le deuxième cas puisque la décharge se produit surtout au voisinage des bords on sera conduit à donner aux isolants une largeur voisine de leur épaisseur. Cette condition est généralement remplie dans les appareils d'électrostatique ou les bouchons isolants sont des cylindres approximativement aussi larges que haut.

RÉSUMÉ

La thèse présentée se résume ainsi :

I

Dans le premier chapitre j'ai étudié les conditions expérimentales (appareils de mesures, forme de la chambre d'ionisation) susceptibles de donner la plus grande sensibilité et le minimum de perturbations dans les mesures électrométriques délicates comme celles que comporte ce travail.

II

Dans le deuxième chapitre, j'étudie expérimentalement comment se comporte un diélectrique électrisé ou non, quand on le place entre les électrodes d'une chambre d'ionisation et je montre que les résultats obtenus entraînent l'hypothèse d'une ionisation de l'air environnant produite par le diélectrique lui-même.

III

Dans le troisième chapitre, j'étudie cette ionisation et je détermine les coefficients d'absorption par l'air et le celluloïd des radiations qui la produisent : j'ai pu ainsi déterminer leur longueur d'onde qui est voisine d'une vingtaine d'angströms. Ces longueurs d'onde dépendent peu de la nature du diélectrique.

IV

Dans le quatrième chapitre je montre que les fréquences des radiations émises sont liées au pouvoir inducteur spécifique de la substance émettrice par une relation simple que j'ai établie expérimentalement. Je montre ensuite comment cette relation s'explique théoriquement ce qui m'amène à donner une explication quantique du rayonnement émis. De cette explication résultent quelques conséquences concernant l'électrisation des diélectriques.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Détermination par chocs électroniques
des potentiels d'ionisation des molécules
diatomiques.

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 2 Mai 1939.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Ch. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,
G. ROUSSY.

